

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Karlo Prebeg**

Zagreb, 2017. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**UTJECAJ PARAMETARA  
VOZILA NA  
PODUPRAVLJIVOST /  
PREUPRAVLJIVOST VOZILA**

Mentor:

Doc dr. sc. Goran Šagi, dipl. ing.

Student:

Karlo Prebeg

Zagreb, 2017. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru Doc. dr. sc. Goranu Šagiju na stručnom vođenju, savjetima te ustupljenoj literaturi za vrijeme izrade rada. Također se zahvaljujem svojoj obitelji na podršci tijekom izrade rada i cjelokupnog trajanja studija.

Karlo Prebeg



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Karlo Prebeg**

Mat. br.: 0035190398

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj parametara vozila na podupravljivost / preupravljivost vozila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of vehicle parameters on vehicle understeering / oversteering behaviour**

Opis zadatka:

Računalne simulacije danas su nezaobilazne u procesu razvoja vozila, njegovih podsustava i komponenata. Programski paketi za analizu dinamike vozila omogućuju simuliranje uvjeta stvarne vožnje i analizu ponašanja vozila u virtualnom okruženju te omogućuju mijenjanje parametara u cilju pronalaženja željenih performansi. Cilj ovog rada je razmotriti utjecaj osnovnih parametara vozila, parametara ovjesa te konfiguracije pogonskog i upravljačkog sustava na podupravljivost / preupravljivost vozila.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- Uz odgovarajuće izraze i dijagrame detaljno objasniti pojavu podupravljivosti i preupravljivosti vozila.
- Napraviti detaljni pregled standardnih ispitnih procedura u kojima se analizira podupravljivost i preupravljivost vozila.
- Prikazati primjere (iz literature) simulacijskih modela za analizu podupravljivosti i preupravljivosti vozila te navesti podatke o složenosti numeričkih modela, podatke o potrebnim parametrima za zadavanje modela i podatke o mogućnostima tih simulacijskih modela.
- Na temelju dostupne literature odrediti koji su najznačajniji parametri koji utječu na podupravljivost i preupravljivost vozila.
- Napraviti detaljni pregled dinamičkih karakteristika koje služe za ocjenu ponašanja vozila.
- Izraditi odgovarajuće modele vozila i ispitnih procedura u programskom paketu CarSim te simulirati nekoliko ispitnih procedura vezanih za analizu podupravljivosti i preupravljivosti vozila.
- Prikazati rezultate simulacija, provesti detaljnu analizu rezultata i donijeti zaključke o utjecaju najznačajnijih parametara na podupravljivost i preupravljivost vozila.

Pri izradi se treba pridržavati uobičajenih pravila za izradu diplomskog rada. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. rujna 2017.

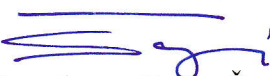
Datum predaje rada:

30. studenog 2017.

Predviđeni datum obrane:

6., 7. i 8. prosinca 2017.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Goran Šagi

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić



## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK .....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UPRAVLJIVOST VOZILA .....	1
1.1. Zahtjevi na upravljivost vozila .....	1
1.2. Ponašanje vozila pri kretanje zavojem.....	2
1.2.1. Kretanje vozila zavojem malom brzinom .....	2
1.2.2. Kretanje vozila zavojem većom brzinom.....	3
1.3. Ustaljena vožnja zavojem i karakteristike upravljivosti .....	6
1.3.1. Definicija podupravljivosti i preupravljivosti prema Masatu Abeu .....	7
1.3.2. Definicija podupravljivosti i preupravljivosti prema Olleyju .....	8
1.3.3. Definicija podupravljivosti i preupravljivosti prema Bergmannu .....	9
1.3.4. Posljedice podupravljivosti i preupravljivosti .....	11
2. STANDARDNE ISPITNE PROCEDURE I UTJECAJNI PARAMETRI .....	13
2.1. Ispitne procedure za ocjenu upravljivosti .....	13
2.1.1. Općeniti opis ispitivanja.....	14
2.1.2. Metoda konstantnog polumjera zavoja .....	14
2.1.3. Metoda konstantne brzine vožnje .....	15
2.1.4. Metoda konstantnog kuta zakreta upravljača .....	16
2.1.5. Mjerene veličine .....	17
2.2. Utjecajni parametri .....	18
2.2.1. Utjecaj pojedinih parametara.....	18
2.2.2. Raspon kretanja pojedinih parametara.....	20
3. SIMULACIJSKI MODELI .....	22
3.1. Složenost modela.....	22
3.2. Prostorni (3D) simulacijski model vozila .....	23
3.2.1. Složenost prostornog modela .....	23
3.2.2. Zadavanje parametara .....	24
3.2.3. Rezultati simulacija.....	25
3.3. Multibody simulacijski model vozila .....	31
3.3.1. Složenost multibody modela .....	31
3.3.2. Korišteni modeli vozila .....	32
3.3.3. Mercedes-Benz A-klasa .....	32
3.3.4. BMW 330xi .....	34
3.3.5. Rezultati simulacija.....	36
4. DINAMIČKE KARAKTERISTIKE I OCJENA PONAŠANJA VOZILA.....	38
4.1. Sustavi otvorene i zatvorene petlje.....	38
4.2. Dinamičke karakteristike propisane ISO 4138 standardom.....	39

4.2.1.	Gradijent kuta zakreta upravljača .....	39
4.2.2.	Gradijent kuta bočnog klizanja .....	39
4.2.3.	Gradijent kuta zakreta oko uzdužne osi .....	40
4.2.4.	Gradijent momenta na upravljaču .....	40
4.2.5.	Gradijent zakrivljenosti putanje kretanja .....	41
4.2.6.	Gradijent kuta zakreta upravljača u ovisnosti o kutu bočnog klizanja vozila .....	41
4.3.	Ostale dinamičke karakteristike .....	42
4.4.	Normalizacija rezultata .....	44
4.4.1.	Normalizacija u odnosu na prijenosi omjer upravljačkog sustava .....	44
4.4.2.	Normalizacija u odnosu na međuosovinski razmak .....	45
5.	PROVEDENE SIMULACIJE I ANALIZA REZULTATA .....	46
5.1.	Simulacijski paket CarSim .....	46
5.1.1.	Korisničko sučelje i mogućnosti programskog paketa .....	47
5.1.2.	Izrada modela vozila .....	56
5.2.	Rezultati simulacija .....	58
5.2.1.	Rezultati modela s pogonom na prednjim kotačima .....	59
5.2.2.	Rezultati modela s pogonom na stražnjim kotačima .....	65
5.2.3.	Usporedba modela različitih konfiguracija pogona .....	74
6.	ZAKLJUČAK .....	80
	LITERATURA .....	81
	PRILOZI .....	82

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Kretanje vozila kroz zavoj malom brzinom [2] .....	2
Slika 2.	Kretanje vozila kroz zavoj velikom brzinom [2] .....	3
Slika 3.	Kretanje vozila kroz zavoj velikom brzinom, model bicikla [2] .....	4
Slika 4.	Ovisnost bočne sile o kutu bočnog klizanja [3] .....	6
Slika 5.	Promjena putanje vozila u odnosu na brzinu vozila [2] .....	7
Slika 6.	Ovisnost kuta zakreta kotača ovisno o položaji težišta i karakteristikama pneumatika [1] .....	9
Slika 7.	Usporedba Bergmannove i Olleyjeve definicije [1] .....	10
Slika 8.	Promjena kutne brzine oko vertikalne osi u odnosu na brzinu vozila [2] .....	11
Slika 9.	Promjena kuta bočnog klizanja u odnosu na brzinu vozila [2] .....	12
Slika 10.	Ispitivanje metodom konstantnog polumjera [6] .....	14
Slika 11.	Ispitni staza sa poligonom za ispitivanje upravljivosti [7] .....	15
Slika 12.	Mehaničko zaključavanje kuta zakreta upravljača [8] .....	16
Slika 13.	Primjer mjerne liste pri ispitivanju metodom konstantnog kuta zakreta upravljača .....	17
Slika 14.	Različiti modeli vozila [9] .....	22
Slika 15.	Prostorni (3D) model vozila [1] .....	23
Slika 16.	Rezultati simulacija inicijalne konfiguracije [1] .....	25
Slika 17.	Rezultati simulacija sa sniženim težištem [1] .....	26
Slika 18.	Rezultati simulacija sa težištem pomaknutim prema stražnjoj osovinu [1] .....	27
Slika 19.	Rezultati simulacija s povišenom osi valjanja vozila [1] .....	28
Slika 20.	Rezultati simulacija s povećanom torzijskom krutosti prednje osovine [1] .....	29
Slika 21.	Rezultati simulacija konfiguracije sa stražnjim pogonom [1] .....	30
Slika 22.	Multibody model vozila [10] .....	31
Slika 23.	Simulacijski model za Mercedes-Benz A-klasu [11] .....	32
Slika 24.	Simulacijski model za BMW 330xi [11] .....	34
Slika 25.	Rezultati ispitivanja i simulacija za Mercedes-Benz A-klasu [8] .....	36
Slika 26.	Rezultati ispitivanja i simulacija za BMW 330xi [8] .....	37
Slika 27.	Shematski prikaz sustava otvorene i zatvorene petlje [1] .....	38
Slika 28.	Princip rada CarSim-a [9] .....	46
Slika 29.	Osnovni izbornik CarSim-a .....	47
Slika 30.	Definiranje ispitne procedure .....	48
Slika 31.	Definiranje sustava vozila .....	49
Slika 32.	Definiranje osnovnih dimenzija vozila .....	50
Slika 33.	Definiranje pogonskog sklopa .....	51
Slika 34.	Definiranje upravljačkog sustava .....	52
Slika 35.	Definiranje parametara ovjesa .....	53
Slika 36.	Definiranje opružno-prigušnih karakteristika .....	54
Slika 37.	Definiranje parametara pneumatika .....	55
Slika 38.	Kut zakreta upravljača, FWD, poticanje podupravljalivosti .....	59
Slika 39.	Kut bočnog klizanja vozila, FWD, poticanje podupravljalivosti .....	60
Slika 40.	Gradijent podupravljalivosti, FWD, poticanje podupravljalivosti .....	61
Slika 41.	Kut zakreta upravljača, FWD, poticanje preupravljalivosti .....	62
Slika 42.	Kut bočnog klizanja vozila, FWD, poticanje preupravljalivosti .....	63
Slika 43.	Gradijent podupravljalivosti, FWD, poticanje preupravljalivosti .....	64

Slika 44.	Kut zakreta upravljača, RWD, poticanje podupravljalivosti.....	65
Slika 45.	Kut bočnog klizanja vozila, RWD, poticanje podupravljalivosti .....	66
Slika 46.	Gradijent podupravljalivosti, RWD, poticanje podupravljalivosti.....	67
Slika 47.	Isječci iz simulacije, RWD, poticanje podupravljalivosti .....	68
Slika 48.	Kut zakreta upravljača, RWD, poticanje preupravljalivosti.....	69
Slika 49.	Kut bočnog klizanja vozila, RWD, poticanje preupravljalivosti.....	70
Slika 50.	Gradijent podupravljalivosti, RWD, poticanje preupravljalivosti.....	71
Slika 51.	Kutna brzina oko vertikalne osi, RWD, poticanje preupravljalivosti.....	72
Slika 52.	Isječci iz simulacije, RWD, poticanje preupravljalivosti.....	72
Slika 53.	Kut zakreta upravljača, različite konfiguracije pogona, poticanje podupravljalivosti .....	74
Slika 54.	Kut bočnog klizanja vozila, različite konfiguracije pogona, poticanje podupravljalivosti .....	75
Slika 55.	Gradijent podupravljalivosti, različite konfiguracije pogona, poticanje podupravljalivosti .....	76
Slika 56.	Kut zakreta upravljača, različite konfiguracije pogona, poticanje preupravljalivosti .....	77
Slika 57.	Kut bočnog klizanja vozila, različite konfiguracije pogona, poticanje preupravljalivosti .....	78
Slika 58.	Gradijent podupravljalivosti, različite konfiguracije pogona, poticanje preupravljalivosti .....	79

## POPIS TABLICA

Tablica 1.	Karakteristike upravljivosti prema Olleyu .....	8
Tablica 2.	Karakteristike upravljivosti prema Bergmannu .....	10
Tablica 3.	Karakteristike upravljivosti sa nelinearnim karakteristikama pneumatika .....	11
Tablica 4.	Utjecaj pojedinih parametara na upravljivost .....	19
Tablica 5.	Raspon vrijednosti pojedinih utjecajnih parametara .....	20
Tablica 6.	Konstruktivske mjere s utjecajem na upravljivost .....	21
Tablica 7.	Zadani parametri modela s dva traga kotača .....	24
Tablica 8.	Izmjena parametara u simulaciji .....	24
Tablica 9.	Vrijednosti osnovnih parametara za Mercedes-Benz A klasu .....	33
Tablica 10.	Vrijednosti osnovnih parametara za BMW 330xi.....	35
Tablica 11.	Ostale dinamičke karakteristike .....	42
Tablica 12.	Subjektivni kriteriji za ocjenu upravljivosti vozila .....	43
Tablica 13.	Vrijednost parametra inicijalne konfiguracije vozila .....	56
Tablica 14.	Izmjene parametara s ciljem postizanja podupravljivosti / preupravljivosti .....	57
Tablica 15.	Grupiranje utjecajnih parametara .....	58

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$a_x$	$m/s^2$	Uzdužno ubrzanje
$a_y$	$m/s^2$	Bočno ubrzanje
$d$	m	Širina traga kotača
$g$	$m/s^2$	Gravitacijska konstanta
$h_1$	mm	Visina središta valjanja prednje osovine
$h_2$	mm	Visina središta valjanja stražnje osovine
$I_x$	$kgm^2$	Moment inercije oko x-osi
$I_y$	$kgm^2$	Moment inercije oko y-osi
$I_z$	$kgm^2$	Moment inercije oko z-osi
$K_f$	$N/^\circ$	Koeficijent proporcionalnosti (krutosti) pneumatika prednje osovine
$K_r$	$N/^\circ$	Koeficijent proporcionalnosti (krutosti) pneumatika stražnje osovine
$l$	m	Međuosovinski razmak
$l_f$	m	Udaljenost od prednje osovine do težišta
$l_r$	m	Udaljenost od stražnje osovine do težišta
$m$	kg	Masa vozila
$M_H$	Nm	Moment na upravljaču
$m_{kot}$	kg	Masa jednog kotača
$r$	$^\circ/s$	Kutna brzina oko vertikalne osi
$r_s$	$^\circ/s$	Kutna brzina oko vertikalne osi pri $V \approx 0$
$S_f$	mm	Širina traga prednjih kotača
$S_r$	mm	Širina traga stražnjih kotača
$v$	$m/s$	Brzina vozila
$\beta$	$^\circ$	Kut bočnog klizanja vozila
$\beta_f$	$^\circ$	Kut bočnog klizanja prednje osovine
$\beta_r$	$^\circ$	Kut bočnog klizanja stražnje osovine
$\beta_s$	$^\circ$	Kut između uzdužne osi vozila i pravca kretanja pri $V \approx 0$
$\delta$	$^\circ$	Kut zakreta upravljivih kotača
$\delta_H$	$^\circ$	Kut zakreta upravljača
$\rho$	m	Polumjer skretanja
$\rho_s$	m	Polumjer skretanja pri $V \approx 0$
$\varphi_V$	$^\circ$	Kut zakreta oko uzdužne osi

## **SAŽETAK**

Ovaj rad bavi se istraživanjem utjecaja osnovnih parametara vozila na podupravljaljivost / preupravljaljivost vozila. Razmatraju se parametri ovjesa, konfiguracije pogona i upravljačkog sustava te drugi parametri. U okviru rada objašnjene su pojave podupravljaljivosti / preupravljaljivosti, dan je pregled standardnih ispitnih procedura za analizu navedenih pojava te su prikazani primjeri simulacijskih modela. Određeni su najutjecajni parametri te je napravljen pregled dinamičkih karakteristika koje služe za ocjenu ponašanja vozila. U programskom paketu CarSim izrađeni su modeli vozila te su provedene simulacije. Na kraju su dani rezultati simulacija te je provedena analiza dobivenih podataka, uz donošenje zaključka o utjecaju korištenih parametara vozila.

Ključne riječi: podupravljaljivost / preupravljaljivost, parametri vozila, računalne simulacije

## **SUMMARY**

This paper deals with research on influence of vehicle parameters on vehicle understeering / oversteering. Parameters taken into consideration include suspension, powertrain, steering system and others. Understeer / oversteer phenomenons are explained witihin the scope of the paper, along with an overview of standard test procedures used to analyze vehicle behaviour and simulation model examples. Parameters with the most significant influence are shown and dynamic characteristics used for vehicle maneuverability evaluation are determined. Simulation software CarSim is used to create vehicle models and to run the simulations. Simulation results are presented and analyzed, with a brief conclusion about the influence of the given parameters.

Key words: understeer / oversteer, vehicle parameters, computer simulation



## 1. UPRAVLJIVOST VOZILA

Upravljivost vozila definirana je kao odziv vozila kako na ulazne pobude vozača tako i na poremećaje koje djeluju na vozilo tijekom kretanja. Vozilo koje je okarakterizirano kao dobro upravljivo sposobno je održavati zadanu putanju minimalizirajući utjecaj poremećaja [1]. Zadaća je ovjesa povezivanje i ostvarivanje neprestanog kontakta vozila s podlogom, te preuzimanje i apsorpiranje poremećajnih sila, neovisno o opterećenju vozila. Zadaća upravljačkog sustava je precizno upravljanje kotačima prednje (i/ili stražnje) osovine kako bi vozilo pratilo zadanu putanju. Također je poželjno da upravljački sustav vozaču daje određenu povratnu informaciju, te da je ponašanje vozila što je moguće više predvidljivo.

### 1.1. Zahtjevi na upravljivost vozila

Zadovoljavanje zahtjeva upravljivosti putničkih vozila treba ostati što je konstantnije moguće tijekom uporabnog vijeka vozila. Neki od zahtjeva, prema [1], glase:

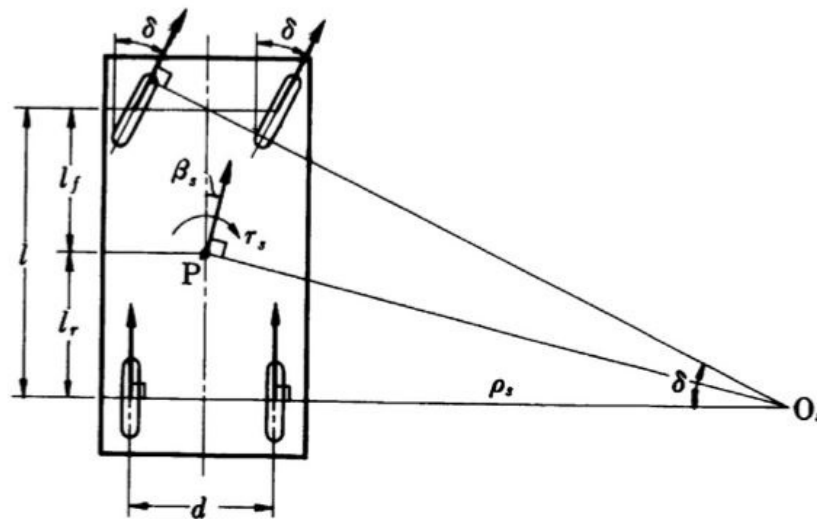
- Visoka razina sigurnosti u vožnji, s neutralnim ili blago podupravljivim ponašanjem vozila,
- Stabilna upravljivost i kontrola vozila pri svim uvjetima do granice stabilnosti,
- Dobro ponašanje vozila pri kretanju zavojem,
- Ograničena osjetljivost na preraspodjelu opterećenja,
- Adekvatno upozorenje pri približavanju vozila granici stabilnosti.

Upravljivost vozila može se ocijeniti subjektivnim i objektivnim metodama. Oba načina su korištena u procesu razvoja vozila, gdje se objektivne metode, uključujući i računalne simulacije, koriste u ranijim fazama razvoja bez vozača (sustav otvorene petlje), dok se subjektivne metode uz pomoć testnog vozača (sustav zatvorene petlje) koristi za fino podešavanje upravljivosti vozila.

## 1.2. Ponašanje vozila pri kretanju zavojem

### 1.2.1. Kretanje vozila zavojem malom brzinom

Osim ponašanja vozila pri ubrzavanju i usporavanju, upravljivost vozila još podrazumjeva i ponašanje vozila pri kretanju zavojem. Razlikuje se kretanje vozila zavojem malom i velikom brzinom. Pri kretanju vozila zavojem relativno malom brzinom (parkiranje i slični manevri), vidljivo na Slika 1., u pneumaticima ne dolazi do razvijanja bočnih sila.



Slika 1. Kretanje vozila kroz zavoj malom brzinom [2]

Kako nema kuta bočnog klizanja, svaki pojedini kotač kreće se u smjeru svoje rotacije te uz to rotira oko točke  $O_s$ . Iz Slika 1. moguće je odrediti geometrijske jednadžbe skretanja pri maloj brzini:

$$\begin{aligned}\rho_s &= \frac{l}{\delta}, \\ r_s &= \frac{v}{\rho_s} = \frac{v}{l} \delta, \\ \beta_s &= \frac{l_r}{\rho_s} = \frac{l_r}{l} \delta.\end{aligned}\tag{1}$$

Gdje je:

$\rho_s$  – polumjer skretanja pri  $v \approx 0$ ,

$l$  – međuosovinski razmak,

$l_r$  – uzdužna udaljenost od stražnje osovine do težišta vozila,

$\delta$  – kut zakreta kotača prednje (upravljive) osovine,

$r_s$  – kutna brzina oko vertikalne osi pri  $v \approx 0$ ,

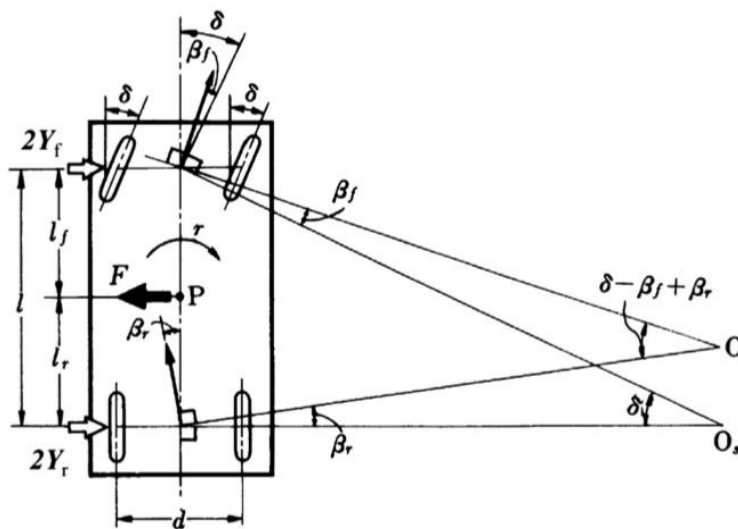
$v$  – brzina vozila,

$\beta_s$  – kut između uzdužne osi simetrije vozila i smjera kretanja težišta vozila.

Geometrijske jednadžbe vrijede uz pretpostavke da je  $0 < \delta \ll 1$  te  $l \ll \rho_s$ . Iako stvarni kut zakreta unutarnjeg i vanjskog kotača prednje osovine nije jednak, već se unutarnji kotač zakrene za nešto veći kut od vanjskog, ukoliko vrijede relacije  $0 < \delta \ll 1$  te  $\rho_s \ll d$ , gdje je  $d$  širina traga kotača, ta je razlika zanemariva.

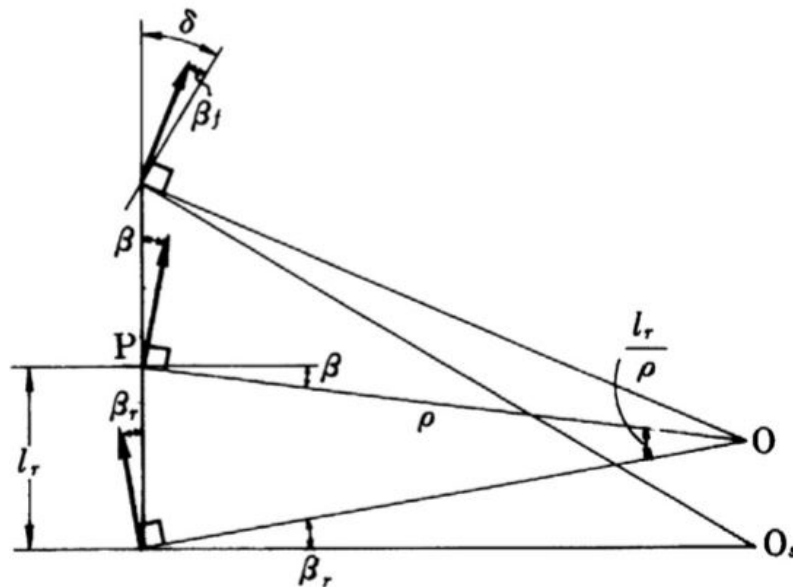
### 1.2.2. Kretanje vozila zavojem većom brzinom

Kada se razmatra kretanje vozila zavojem većom brzinom, utjecaj centrifugalne sile postaje značajan. Da se odupru djelovanju centrifugalne sile, u pneumaticima se javljaju bočne sile. Centrifugalna sila djeluje u težištu vozila, te stoga pretpostavke gibanja pokazane Slika 1. više ne vrijede.



Slika 2. Kretanje vozila kroz zavoj velikom brzinom [2]

Pretpostavljeno gibanje vozila kroz zavoj velikom brzinom prikazano je na Slika 2. Vidljivo je kako se pol brzina više na nalazi na pravcu koji prolazi kroz stražnju osovinu, te kako se kotači ne gibaju pravcem koji prolazi kroz uzdužnu ravninu simetrije kotača. Naime, kako bi pneumatici mogli razviti bočne sile, potreban je određeni kut bočnog klizanja. Radi lakšeg razumjevanja geometrije gibanja vozila, ono je na Slika 3. svedeno na jedan trag kotača, odnosno model bicikla.



Slika 3. Kretanje vozila kroz zavoj velikom brzinom, model bicikla [2]

Pol brzina sada se nalazi na presjecištu okomica na pravce gibanja prednjih i stražnjih kotača. Polumjer skretanja težišta vozila tada iznosi:

$$\rho = \frac{l}{\delta - \beta_f + \beta_r}. \quad (2)$$

Gdje je:

$\beta_f$  – kut bočnog klizanja prednje osovine,

$\beta_r$  – kut bočnog klizanja stražnje osovine.

Nadalje, kutna brzina oko vertikalne osi određena je izrazom:

$$r = \frac{v}{\rho} = \frac{v(\delta - \beta_f + \beta_r)}{l}. \quad (3)$$

Iz geometrije na Slika 3., također se može doći do izraza:

$$\beta + \beta_r = \frac{l_r}{\rho}. \quad (4)$$

Gdje je:

$\beta$  – kut bočnog klizanja vozila.

Prebacivanjem kuta bočnog klizanja stražnje osovine na desnu stranu te uvrštavanjem jednadžbe (2) dobije se:

$$\beta = \frac{l_r}{\rho} - \beta_r = \frac{l_r}{l} \delta - \frac{l_r \beta_r - l_f \beta_f}{l}. \quad (5)$$

Jednadžbe (2), (3) i (5) opisuju gibanje vozila kroz zavoj velikom brzinom te su dobivene iz geometrijske relacije ustaljene vožnje kroz zavoj (Slika 3.). Kuteve bočnog klizanja prednje i stražnje osovine moguće je odrediti iz sume sila ustaljene vožnje kroz zavoj. Centrifugalnoj sili suprotstavljaju se bočne sile na kotačima prednje i stražnje osovine. Sile su proporcionalne kutu bočnog klizanja, te pri ustaljenoj vožnji vrijedi jednadžba dobivena iz Slika 2.:

$$\begin{aligned} \frac{mv^2}{\rho} - 2K_f \beta_f - 2K_r \beta_r &= 0, \\ -2l_f K_f \beta_f + 2l_r K_r \beta_r &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

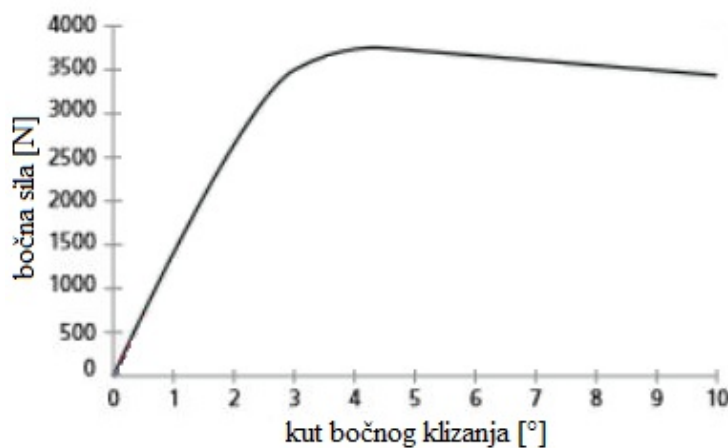
Gdje je:

$m$  – masa vozila,

$K_f$  – koeficijent proporcionalnosti kotača prednje osovine,

$K_r$  – koeficijent proporcionalnosti kotača stražnje osovine.

Koeficijent proporcionalnosti u stranoj literaturi još se naziva i *cornering stiffness*. Ovisnost bočne sile o kutu bočnog klizanja prikazana je na Slika 4. Vidljivo je da je ovisnost linerna do određene vrijednosti, ovisno o konstrukciji i vertikalnom opterećenju pneumatika, te da zatim doseže maksimalnu vrijednost te počinje opadati.



Slika 4. Ovisnost bočne sile o kutu bočnog klizanja [3]

Iz izraza danih jednadžbom (6) moguće je odrediti izraze za kuteve bočnog klizanja prednje i stražnje osovine:

$$\begin{aligned}\beta_f &= \frac{mv^2 l_r}{2lK_f} \cdot \frac{1}{\rho}, \\ \beta_r &= \frac{mv^2 l_f}{2lK_r} \cdot \frac{1}{\rho}.\end{aligned}\tag{7}$$

### 1.3. Ustaljena vožnja zavojem i karakteristike upravljivosti

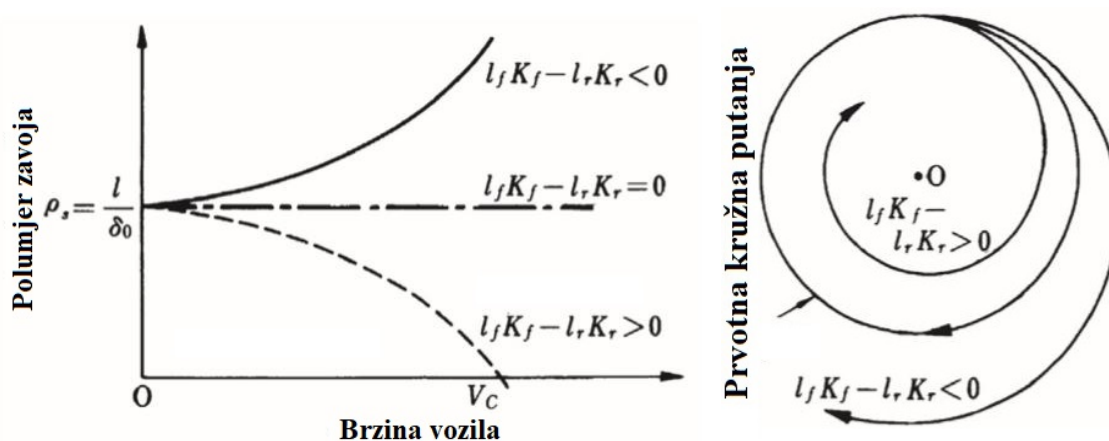
U normalnim uvjetima vožnje, vozilo koje se giba konstantnom brzinom, za određeni konstantni kut zakreta upravljivih kotača, kretati će se kružnom putanjom konstantnog polumjera. Takav slučaj naziva se ustaljena vožnja zavojem, te razumjevanje iste omogućava razmatranje karakterističnih slučajeva upravljivosti vozila.

### 1.3.1. Definicija podupravljivosti i preupravljivosti prema Masatu Abeu

Polumjer kretanja vozila, izražen jednadžbom (2), koristeći izraze za kuteve bočnog klizanja iz jednadžbe (7), može se zapisati i kao:

$$\rho = \left( 1 - \frac{m}{2l^2} \cdot \frac{l_f K_f - l_r K_r}{K_f K_r} v^2 \right) \cdot \frac{l}{\delta}. \quad (8)$$

Gornja jednadžba opisuje kako se polumjer kretanja vozila mijenja s brzinom vozila, za konstantan kut zakreta upravljača. Vidljivo je kako promjena polumjera kretanja ovisi o članu  $l_f K_f - l_r K_r$ . Ukoliko je navedeni član jednak nuli, brzina vozila nema utjecaja na polumjer kojim se ono kreće, te ima konstantnu vrijednost  $l/\delta$ . Polumjer kretanja vozila povećavati će se za slučaj kada je  $l_f K_f - l_r K_r < 0$ , a smanjivati ukoliko je isti izraz manji od 0. U slučaju kada je  $l_f K_f - l_r K_r < 0$ , a kut zakreta upravljivih kotača se drži konstantnim, pri povećanju brzine vozila isti je nedovoljan kako bi se zadržala prvotna putanja vozila. Takva karakteristika vozila naziva se podupravljivost.



Slika 5. Promjena putanje vozila u odnosu na brzinu vozila [2]

Suprotni slučaj, kada je  $l_f K_f - l_r K_r > 0$ , ima za posljedicu pretjerano veliki kut zakreta upravljivih kotača te se vozilo kreće polumjerom manjim od prvotnog, naziva se preupravljivost. Neutralna karakteristika upravljivosti je ona pri kojoj ne dolazi do promjene putanje vozila s brzinom, odnosno kada je izraz  $l_f K_f - l_r K_r$  jednak 0.

### 1.3.2. Definicija podupravljivosti i preupravljivosti prema Olleyju

Kutevi bočnog klizanja prednje i stražnje osovine mogu se zapisati kao:

$$\begin{aligned}\beta_f &= \delta + \beta - \frac{l_f \cdot r}{v}, \\ \beta_r &= \beta + \frac{l_r \cdot r}{v}.\end{aligned}\tag{9}$$

Razlika kuteva bočnog klizanja može se zapisati i kao:

$$\begin{aligned}\Delta\beta &= \beta_f - \beta_r, \\ \Delta\beta &= \delta + \beta - \frac{l_f \cdot r}{v} - \beta - \frac{l_r \cdot r}{v} = \delta - \frac{l \cdot r}{v}.\end{aligned}\tag{10}$$

Olleyjeva definicija upravljivosti bazira se isključivo na razlici kuteva bočnog klizanja prednje i stražnje osovine. Ponašanje vozila prema Olleyju prikazano je u Tablica 1.

**Tablica 1. Karakteristike upravljivosti prema Olleyu**

Ponašanje vozila	Stanje
Preupravljivo	$\Delta\beta = \beta_f - \beta_r > 0$
Neutralno ponašanje	$\Delta\beta = \beta_f - \beta_r = 0$
Podupravljivo	$\Delta\beta < \beta_f - \beta_r < 0$

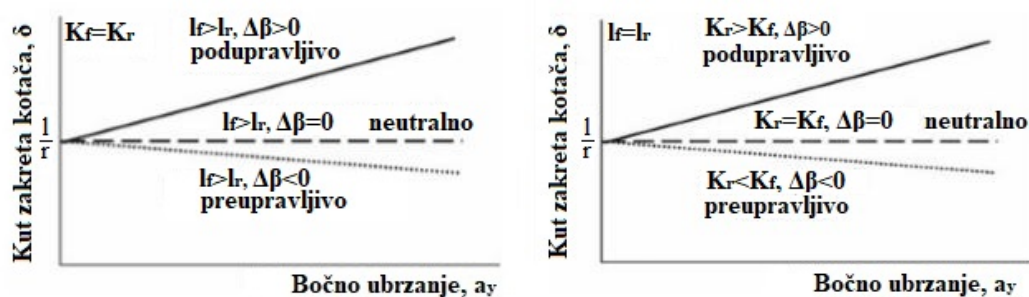
Prema Olleyjevoj definiciji, ne promatra se gradijent kuta zakreta upravljivih kotača, već krivulja apsolutnog kuta zakreta upravljivih kotača. Prema jednadžbi (10), karakteristika upravljivosti, ako se uzme u obzir da se kut zakreta upravljivih kotača drži konstantnim, ovisi o odnosu  $r/v$ , odnosno kako se mijenja kutna brzina oko vertikalne osi s promjenom brzine vozila.



Za bolje razumijevanje Olleyjeve definicije i donošenje određenih zaključaka, potrebno je razliku kuteva bočnog klizanja prednje i stražnje osovine prikazati preko udaljenosti osovina od težišta i koeficijenata proporcionalnosti:

$$\Delta\beta = \frac{m}{l} \cdot \left( \frac{l_r}{2K_f} - \frac{l_f}{2K_r} \right) \cdot \frac{v^2}{\rho}. \quad (11)$$

Iz jednadžbe (11) moguće je izdvojiti 2 karakteristična slučaja vezana uz karakteristike pneumatika ( $K_f$  i  $K_r$ ) te položaja težišta ( $l_f$  i  $l_r$ ). Uz pretpostavku da prednji i stražnji kotači imaju jednake karakteristike pneumatika,  $\Delta\beta$  će tada ovisiti isključivo o razlici  $l_f - l_r$ . Ukoliko se težište pomakne prema naprijed, odnosno  $l_f > l_r$ , vozilo će imati podupravljivo karakteristiku, dok će u suprotnom biti preupravljivo. Ukoliko se težište nalazi na polovini međuosovinskog razmaka, ponašanje vozila je neutralno.



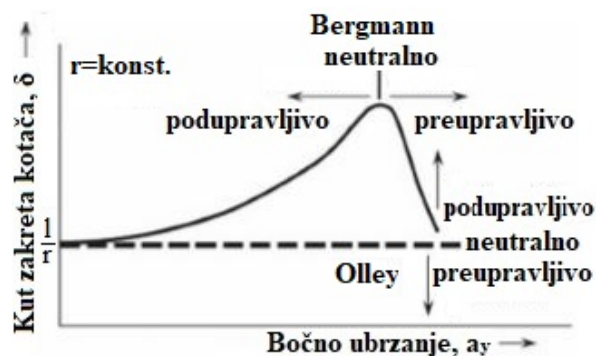
Slika 6. Ovisnost kuta zakreta kotača ovisno o položaju težišta i karakteristici pneumatika [1]

U drugom slučaju težište se nalazi na polovini međuosovinskog razmaka, a varira se karakteristika pneumatika. Ukoliko su stražnji pneumatici veće krutosti od prednjih, član unutar zagrade postaje veći od 0 te je vozilo podupravljivo, dok je u suprotnom preupravljivo. Ukoliko su karakteristike pneumatika jednake, tada se, kao i u prvom slučaju, radi o vozilu se neutralnom karakteristikom upravljivosti.

### 1.3.3. Definicija podupravljivosti i preupravljivosti prema Bergmannu

Upotreba Olleyjeve definicije je ograničena, upravo iz razloga što je za upravljivost vozila bitnije poznavati vrijednost gradijenta  $d\delta/da_y$  pri prolasku vozila kroz zavoj nego same iznose zakreta upravljivih kotača te kuteva bočnog klizanja osovina. Karakteristika pneumatika (bočna krutost) mijenja se pri visokim vrijednostima bočnog ubrzanja. Linearna ovisnost

između razlike kuteva bočnog klizanja i bočnog ubrzanja, kao i linearna ovisnost kuta zakreta upravljivih kotača i bočnog ubrzanja, više ne vrijedi. Kao posljedica navedenog, moguće je da vozilo koje je prema Olleyju okarakterizirano kao podupravljivo, prema Bergmannu odgovara preupravljivom vozilu.



Slika 7. Usporedba Bergmannove i Olleyjeve definicije [1]

Perturbacijom jednadžbe (8), te deriviranjem po  $a_y$ , dobije se vrijednost gradijenta:

$$\frac{d\delta}{da_y} = \frac{m}{l} \left( \frac{l_r}{2K_f} - \frac{l_f}{2K_r} \right). \quad (12)$$

Bergmannova definicija karakteristika upravljivosti vozila, u ovisnosti u gradijentu  $d\delta/da_y$ , prikazana je u Tablica 2.:

Tablica 2. Karakteristike upravljivosti prema Bergmannu

Ponašanje vozila	Stanje
Preupravljivo	$d\delta/da_y < 0$
Neutralno ponašanje	$d\delta/da_y = 0$
Podupravljivo	$d\delta/da_y > 0$

Bergmannova evaluacija smatra se standardnom pri definiciji pojmova podupravljivosti i preupravljivosti.

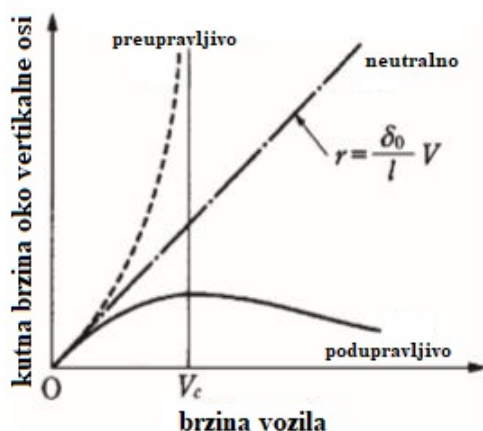
Proširenjem modela nelinearnim karakteristikama pneumatika, prikazano u Tablica 3., dolazi se do definicije prema Abeu.

**Tablica 3. Karakteristike upravljivosti sa nelinearnim karakteristikama pneumatika**

Ponašanje vozila	Stanje
Preupravljivo	$K_r(\beta_r) \cdot l_r < K_f(\beta_f) \cdot l_f$
Neutralno ponašanje	$K_r(\beta_r) \cdot l_r = K_f(\beta_f) \cdot l_f$
Podupravljivo	$K_r(\beta_r) \cdot l_r > K_f(\beta_f) \cdot l_f$

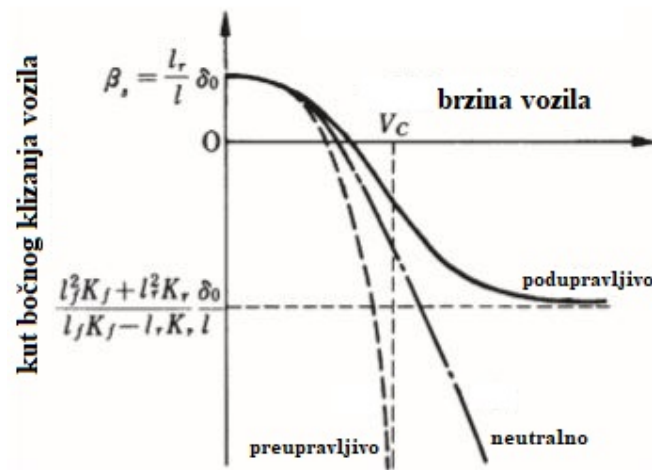
#### 1.3.4. Posljedice podupravljivosti i preupravljivosti

Korištenjem jednadžbi iz prethodnih poglavlja, postavljenih za model bicikla, mogu se izvući zaključci o posljedicama karakteristika upravljivosti vozila. Tijekom prolaska kroz zavoj, bočno ubrzanje vozila rezultira pojavom centrifugalne sile. Kako bi vozilo nastavilo prolaziti zakrivljenom putanjom, pneumatici moraju razviti bočne reaktivne sile. Pri dosezanju maksimalne ostvarive sile na pojedinoj osovini, njen kut bočnog klizanja doživljava značajan porast. Ukoliko do granice ostvarive bočne sile dođe na prednjoj osovini, vozilo se ponaša podupravljivo, te se vrijednost kuta bočnog klizanja vozila  $\beta$  smanjuje do minimalne vrijednosti (asimptotski joj se približava, vidljivo na Slika 9.). Posljedica toga je povećanje polumjera kretanja vozila te smanjenje bočnog ubrzanja  $a_y$ , što smanjuje bočno opterećenje pneumatika, te smanjenje kutne brzine oko vertikalne osi, što ima stabilizirajući efekt na vozilo.



**Slika 8. Promjena kutne brzine oko vertikalne osi u odnosu na brzinu vozila [2]**

Kod preupravljivog vozila, granica ostvarive bočne sile doseže se na stražnjoj osovini. Pri manjim brzinama vozila, kut bočnog klizanja  $\beta$  također opada, no ne doseže maksimum već teži prema  $-\infty$ . Brzina pri kojoj doseže tu vrijednost naziva se kritična brzina vozila. Također, kod preupravljivog vozila porastom brzine vozila, kutna brzina oko vertikalne osi raste u beskonačnost, koju doseže pri kritičnoj brzini, vidljivo prema Slika 8.



Slika 9. Promjena kuta bočnog klizanja u odnosu na brzinu vozila [2]

## 2. STANDARDNE ISPITNE PROCEDURE I UTJECAJNI PARAMETRI

Ispitivanje vozila nezaobilazan je korak u procesu razvoja vozila. Ono se može raditi na više načina – mjerenja na ispitnim stolovima, gdje se ispituju komponente, podsustavi ili kompletna vozila u laboratorijskim uvjetima, zatim mjerenje u uvjetima stvarne vožnje ili na ispitnim poligonima, te ispitivanje korištenjem računalnih simulacija. Ispitne procedure provode se radi procjene dinamike vozila, primjerice upravljivosti, stabilnosti i drugih. Smisao procedura je simulacija različitih situacija u kojima će se vozilo naći u stvarnim uvjetim vožnje ili ekstremnih situacija koje se nastoje izbjeći. Neke od procedura standardizirane su od strane Međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO – tehnički odbor 22, pododbor 9, zadužen za dinamiku vozila), dok je dio osmišljen i provodi se od strane proizvođača vozila.

### 2.1. Ispitne procedure za ocjenu upravljivosti

Ispitne procedure za ocjenu upravljivosti, vezane uz određivanje karakteristika podupravljivosti / preupravljivosti putničkih vozila propisane standardom ISO 4138. Radi se o ispitnim procedurama otvorene petlje. Standard ISO 4138 propisuje tri različite procedure za ispitivanje upravljivosti vozila:

- Ispitna procedura metodom konstantnog polumjera zavoja,
- Ispitna procedura metodom konstantne brzine vožnje,
- Ispitna procedura metodom konstantnog kuta zakreta upravljača.

Uz navedene 3 metode, prema [4], postoji još i metoda konstantnog položaja pedale za snagu. Prema [4], metode konstantnog polumjera zavoja i konstantne brzine vožnje prikazuju realne slučajeve u kojima se vozilo u prometu nalazi, te su stoga i najzastupljenije pri izvođenju ispitivanja.

### 2.1.1. Općeniti opis ispitivanja

Sve potrebne varijable mjere se kroz cijelo trajanje ispitivanja. Podatke je potrebno mjeriti za prolazak i kroz lijevi i kroz desni zavoj. Ukoliko se ispitivanje radi korištenjem diskretnih metoda, prvo se radi niz ispitivanja vozila u jednom, a potom u drugom smjeru. Naizmjenično ispitivanje je dozvoljeno, no radi minimizacije rasipanja podataka, preporuča se korištenje prvog načina. Ispitivanje je potrebno provoditi uz sve potrebne mjere opreza, te ga je potrebno provesti više puta kako bi se potvrdila ponovljivost te napravilo osrednjavanje rezultata.

### 2.1.2. Metoda konstantnog polumjera zavoja

Vozilo se kreće kružnom putanjom konstantnog polumjera zakrivljenosti. Prema [5], preporuka je da najmanja vrijednost polumjera ne bude manja od 30 m. Većina ispitivanja provodi se na polumjeru iznosa 100 m. Postoje dvije varijacije ispitne procedure, sa diskretnim i kontinuiranim mjerenjem potrebnih veličina. Kod metode s diskretnim mjerenjem, vozilo sukcesivno povećava brzinu vožnje, te se podaci uzimaju pri ustaljenom stanju gibanja na željenoj brzini, u trajanju od 3 sekunde. Metoda s kontinuiranim mjerenjem uključuje konstantno povećanje brzine vožnje, u iznosu ne većem od 1,5 km/h/s, te kontinuirano bilježenje podataka. Kod kontinuirane metode, bočno ubrzanje raste približno ustaljeno, te kod obje varijante najveća preporučena brzina porasta bočnog ubrzanja iznosi 0,1 m/s<sup>2</sup>/s, dok se ispitivanje prekida ukoliko vozila odstupa više od  $\pm 0,5$  m od zadane putanje.



Slika 10. Ispitivanje metodom konstantnog polumjera [6]



### 2.1.3. Metoda konstantne brzine vožnje

Metoda zahtjeva vožnju ispitivanog vozila konstantnom brzinom vožnje kroz raspon kružnih putanja različitog polumjera. Standardna brzina pri ispitivanju iznosi 100 km/h, dok se pri korištenju drugih brzina preporuča inkrementalno povećanje ili smanjenje od 20 km/h. Metoda s diskretnom promjenom polumjera zavoja zahtjeva veći ispitni poligon s označenim kružnicama ili kružnim segmentima različitog polumjera. Preporuča se upotreba mehaničke blokade upravljača kako bi kut zakreta pri mjerenju veličina ustaljenog stanja vožnje bio unutar granica od  $\pm 1$  %. Podaci se uzimaju kroz interval od 3 sekunde kada vozilo dosegne stanje ustaljene vožnje. Potrebna je i kontrola pedale snage kako brzina vozila ne bi oscilirana više od 3 %.



Slika 11. Ispitni staza sa poligonom za ispitivanje upravljivosti [7]

#### 2.1.4. Metoda konstantnog kuta zakreta upravljača

Ispitno vozilo kreće se različitim brzinama vožnje održavajući kut zakreta upravljača konstantnim. Polumjer kretanja vozila određuje se izračunom – pomoću uzdužne brzine i kutne brzine oko vertikalne osi ili pomoću uzdužne brzine i bočnog ubrzanja. Ispitivanje se može provesti na dva različita načina – kao niz diskretnih ispitivanja ili u jednom kontinuiranom ispitivanju. Diskretna metoda zahtjeva vožnju predefiniranim kutem zakreta konstantnom brzinom dok se ne dosegnu uvjeti ustaljene vožnje. Podaci se mjere kroz interval od 3 sekunde u uvjetima ustaljene vožnje. Kontinuirana metoda koristi polagano povećanje brzine vozila držeći kut zakreta upravljača konstantnim, sve do granice upravljivosti vozila. Kao i kod metode konstantnog polumjera, najveći preporučeni porast bočnog ubrzanja iznosi  $0,1 \text{ m/s}^2/\text{s}$ . Standardni kut zakreta, prema [5], je onaj koji pri maloj brzini (standard ne specificira o kojoj se brzini radi) uzrokuje polumjer kretanja vozila od 30 m. Dozvoljeno je korištenje i drugih polumjera, s 20 m kao najmanjom dozvoljenom vrijednosti. Za ispitivanje granice upravljivosti preporuča se polumjer kretanja od 100 ili više metara.



Slika 12. Mehaničko zaključavanje kuta zakreta upravljača [8]



### 2.1.5. Mjerene veličine

Prema standardu, ispitno vozilo mora biti opremljeno odgovarajućom mjernom opremom i pretvornicima propisanim standardom ISO 15037-1. Veličine koje je potrebno mjeriti kako bi bilo moguće ocijeniti upravljivost vozila, prema [5], su:

- Uzdužna brzina vozila ( $v$ ),
- Bočno ubrzanje ( $a_y$ ),
- Kut zakreta upravljača ( $\delta_H$ ),
- Kutna brzina oko vertikalne osi ( $dr/dt$ ),
- Kut bočnog klizanja vozila ( $\beta$ ),
- Uzdužno ubrzanje ( $a_x$ ),
- Kut zakreta oko uzdužne osi ( $\varphi_v$ ),
- Moment na upravljaču ( $M_H$ ).

Alternativno, bočno ubrzanje moguće je odrediti računski iz ostalih varijabli gibanja vozila. Također, kut zakreta upravljivih kotača,  $\delta$  je moguće mjeriti ili izračunati pomoću kuta zakreta upravljača,  $\delta_H$ , te prijenosnog omjera upravljačkog mehanizma,  $i_s$ .

Steady-State Values:	70 kph	80 kph	90 kph	100 kph
Vehicle Speed (km/hr)	69.95	79.94	89.94	99.20
Lateral Acceleration (g's)	0.26	0.29	0.31	0.33
Yaw Rate (degrees/sec)	7.63	7.28	6.95	6.66
Vehicle Roll Angle (degrees)	4.18	4.85	5.32	5.68
Vehicle Slip Angle (degrees)	-0.73	-1.06	-1.38	-1.66
Percent Overshoot:	70 kph	80 kph	90 kph	100 kph
Lateral Acceleration (pct.)	3.86	6.29	9.61	12.81
Yaw Rate (pct.)	15.26	21.01	25.82	30.08
Vehicle Roll Angle (pct.)	5.45	9.11	10.72	13.70
Vehicle Slip Angle (pct.)	25.31	33.34	42.99	52.48
Response Time:	70 kph	80 kph	90 kph	100 kph
Lateral Acceleration (sec)	0.33	0.33	0.34	0.34
Yaw Rate (sec)	0.22	0.20	0.19	0.17
Vehicle Roll (sec)	1.15	1.12	1.09	1.07
Vehicle Slip (sec)	0.83	0.79	0.79	0.79
Handling Performance Metrics	75 kph	85 kph	95 kph	Average
Understeer Gradient (deg/g)	10.80	9.18	8.18	9.39
Vehicle Roll Gradient (deg/g)	27.22	21.62	20.21	23.02

**Slika 13. Primjer mjerne liste pri ispitivanju metodom konstantnog kuta zakreta upravljača**

## 2.2. Utjecajni parametri

Ponašanje vozila pri kretanju zavojem posljedica je njegove konstrukcije i izvedbe pojedinih sklopova vozila. Izvedbe sklopova vozila načelno se odabiru u konceptnoj fazi, te se već tada može odrediti generalni smjer prema kojem će se upravljivost vozila kretati. Za postizanje željenog ponašanja vozila, potrebno je odrediti parametre koji značajno utječu na ponašanje, te njihove vrijednosti podesiti u smjeru optimalne upravljivosti vozila. Podešavanje utjecajnih parametara za posljedicu ima promjenu sila ostvarenih na kontaktnim površinama pneumatika. Općenito, promjena kuta bočnog klizanja pojedinog kotača ili osovine ostvaruje se promjenom vertikalnom opterećenja osovine ili promjenom razlike opterećenja unutarnjeg i vanjskog kotača. Ukoliko se potrebni kut bočnog klizanja prednje osovine povećava, povećava se i tendencija vozila prema podupravljivosti, dok smanjenje potrebnog kuta bočnog klizanja povećava tendenciju vozila prema preupravljivosti. Za stražnju osovinu vrijede obrnute tvrdnje.

### 2.2.1. Utjecaj pojedinih parametara

Utjecaj pojedinog parametra promatra se u odnosu na njegovu početnu vrijednost. Tablica 4. prikazuje neke od utjecajnih parametara prema [1] i [3], čijim se podešavanjem vozilo može podesiti prema željenoj karakteristici upravljivosti. Utjecaj parametara vrijedi za kretanje vozila kružnom putanjom ustaljenim stanjem gibanja. Utjecaj parametara opisan je sa djelovanjem na prednju osovinu. Identična promjena parametara na stražnjoj osovini, odnosno prema suprotnim vrijednostima na prednjoj osovini, prouzročit će obrnuti učinak, to jest, ukoliko je početna posljedica veća podupravljivost, promjena osovine ili vrijednosti u suprotnom smjeru rezultirati će primicanjem tendencije vozila prema preupravljivosti.

**Tablica 4. Utjecaj pojedinih parametara na upravljivost**

Podešavanje parametara	Fizikalni efekt	Posljedica
Povećana širina prednjih pneumatika	Smanjenje potrebnog kuta bočnog klizanja prednje osovine	Preupravljivost
Niža bočna stjenka prednjih pneumatika	Povećana bočna krutost, smanjenje potrebnog kuta bočnog klizanja	Preupravljivost
Povećano opterećenje prednje osovine	Povećanje normalne sile <ul style="list-style-type: none"> <li>• Povećanje prenosive bočne sile</li> <li>• Smanjenje potrebnog kuta bočnog klizanja</li> </ul>	Podupravljivost
Povećana širina traga prednjih kotača	Smanjenje razlike opterećenja unutarnjeg i vanjskog kotača, smanjenje potrebnog kuta bočnog klizanja	Preupravljivost
Smanjenje kuta bočnog nagiba prednjih kotača	Povećanje prenosivih bočnih sila na vanjskom kotaču	Preupravljivost
Povećanje krutosti prednjih opruga	Povećanje razlike opterećenja prednjih kotača i potrebnog kuta bočnog klizanja	Podupravljivost
Povećanje pozitivne usmjerenosti prednjih kotača	Povećanje kuta bočnog klizanja vanjskog te smanjenje kuta bočnog klizanja unutarnjeg kotača	Preupravljivost
Povećanje pozitivnog uzdužnog nagiba osi zakretanja kotača	Smanjenje kuta zakreta kotača uzrokovanog elastičnošću ovjesa	Podupravljivost
Smanjenje tlaka stražnjih pneumatika	Smanjena bočna krutost stražnjih kotača	Podupravljivost

### 2.2.2. Raspon kretanja pojedinih parametara

Vađenjem podataka iz [1], [3] i [9] dobiveni su rasponi vrijednosti parametara iz Tablica 4. prikazani u Tablica 5. Vrijednost parametara dana je brojčano ili vezano uz neku drugu veličinu vozila. Podešavanje parametara putničkih vozila, iz sigurnosnih razloga uglavnom se kreće u smjeru podupravljivosti. Razlog tome je što pri kretanju zavojem prevelikom brzinom, korektivni manevar je dodatno zakretanje upravljača u smjeru skretanja vozila te smanjenje brzine, što je i instinktivna reakcija prosječnog vozača.

**Tablica 5. Raspon vrijednosti pojedinih utjecajnih parametara**

Parametar	Područje vrijednosti
Širina pneumatika	175 mm do 225 mm, inkrementalno po 10 mm
Visina bočne stjenke pneumatika	45 do 75, gdje brojčana vrijednost označava postotak širine pneumatika
Uzdužni položaj težišta, mjereno od prednje osovine	0,4l do 0,6l
Širina traga kotača	1350 mm do 1700 mm
Bočni nagib kotača	-1° do 1°
Krutost opruga	20 N/mm do 200 N/mm
Usmjerenost kotača	-20' do 20'
Uzdužni nagib osi zakretanja kotača	3° do 10°
Tlak u pneumaticima	2 bar do 2.5 bar

Također, postoje parametri koji ne djeluju izravno na povećanje ili smanjenje opterećenja osovine, a imaju značajan utjecaj na ponašanje vozila tijekom gibanja kroz zavoj. Takve parametre, prema [1] je moguće odrediti kao konstrukcijska rješenja cijelog vozila ili pojedinog sklopa.

**Tablica 6. Konstrukcijske mjere s utjecajem na upravljivost**

Sklop vozila	Podešavani parametar
Cijelo vozilo	Međuosovinski razmak
	Visina težišta
	Momenti inercije oko glavnih osi
Kinematika kotača	Krivulje promjene geometrije ovjesa
Osovine i ovjes	Vrsta ovjesa
	Kinematika i elastokinematika
Pneumatici	Oblik gaznog sloja
	Koeficijent krutosti pneumatika
Pogonski sklop	Karakteristike zaključavanja diferencijala

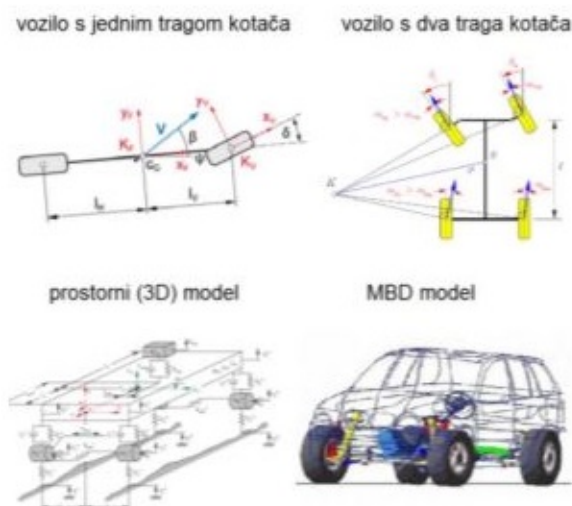
Neke od navedenih parametara, primjerice oblik gaznog sloja pneumatika ili elastokinematiku ovjesa, nije moguće definirati u korištenom simulacijskom paketu, te njihov utjecaj na ponašanje vozila neće biti razmatran.

### 3. SIMULACIJSKI MODELI

Razvojem računalnih sustava pojavila se mogućnost korištenja računalnih simulacija u procesu razvoja vozila. Računalne simulacije nastoje što je točnije moguće oponašati stvarne uvjete vožnje, te se njihovim korištenjem značajno skraćuje period razvoja vozila. Točnost simulacija uvelike ovisi o matematičkom modelu na kojemu su bazirane [9]. Ovisno o cilju istraživanja ili fazi razvoja, koriste se modeli različite složenosti, od linearnih jednostavnih modela sa svega nekoliko stupnjeva slobode gibanja, do složenih nelinearnih modela s nekoliko stotina stupnjeva slobode gibanja.

#### 3.1. Složenost modela

Za ispitivanje podupravljlivosti / preupravljlivosti potrebno je poznavati poprečnu dinamiku vozila. Modeli koji se koriste pri analizi poprečne dinamike vozila, gledano kroz rast složenosti modela su: vozilo s jednim tragom kotača (model bicikla), vozilo s dva traga kotača, prostorni (3D) model vozila te *multibody* model vozila. Rast složenosti modela podrazumijeva povećanje broja ulaznih parametara koje je potrebno poznavati pri definiranju vozila, kako i povećanje broja izlaznih parametara, koji proizlaze kao rezultat iz simulacije [9].

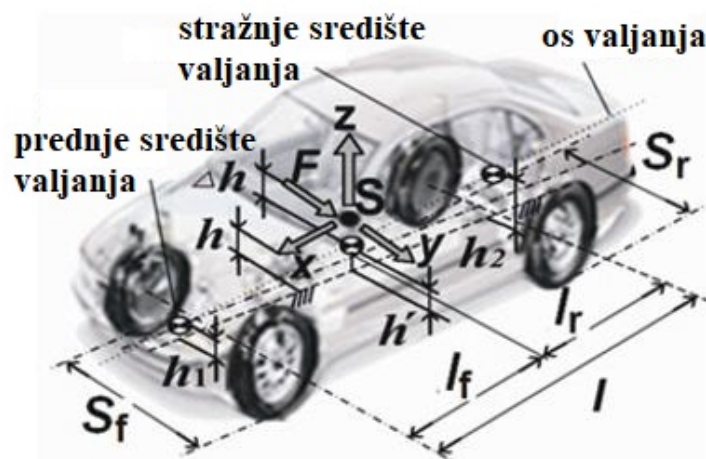


Slika 14. Različiti modeli vozila [9]

### 3.2. Prostorni (3D) simulacijski model vozila

#### 3.2.1. Složenost prostornog modela

Simulacije prostornim (3D) modelom provedene su unutar [1]. Jednostavni prostorni model vozila nadogradnja je ravninskog modela s dva traga kotača. Sastoji se od sedam stupnjeva slobode gibanja, te uključuje ukupnu masu vozila smještenu u težištu vozila, uz četiri zasebne mase kotača, koje predstavljaju neovješenu masu vozila. Ovješena masa povezana je oprugom i prigušnim elementom na svaki kotač, te je također svaki kotač s podlogom povezan oprugom i prigušnim elementom, što predstavlja karakteristiku pneumatika.



Slika 15. Prostorni (3D) model vozila [1]

Ovako postavljeni model omogućava promatranje rotacije vozila oko uzdužne osi (engl. *roll*) i poprečne osi (engl. *pitch*). Os oko koje se ovješena masa vozila rotira ovisi o konstrukciji i kinematici ovjesa. Prostornim modelom moguće je simulirati i preraspodjelu opterećenja osovina i pojedinih kotača, budući da vertikalna koordinata težišta poprima realniju vrijednost u odnosu na ravninske modele, gdje je jednaka nuli. Model korišten u [1] koristi i nelinearni model gume, što može imati značajan utjecaj pri kritičnim situacijama u vožnji. Visine središta valjanja osovina ne mijenjaju se hodom ovjesa, te se opruge modeliraju s linearnom karakteristikom. Zakret vozila oko uzdužne osi dovoljno je mali te dozvoljava korištenje aproksimacije malih kuteva.

### 3.2.2. Zadavanje parametara

Parametri korišteni u simulaciji te njihove inicijalne vrijednosti prikazani su u Tablica 7.

Početna konfiguracija pogona podrazumijeva pogon vozila prednjim kotačima.

**Tablica 7. Zadani parametri modela s dva traga kotača**

Parametar	Početna vrijednost
Masa vozila, $m$	1678 kg
Masa jednog kotača, $m_{kot}$	35 kg
Međuosovinski razmak, $l$	2680 mm
Prednja/stražnja širina traga kotača, $S_f/S_r$	1520 mm
Udaljenost između težišta i prednje osovine, $l_f$	1080 mm
Udaljenost između težišta i stražnje osovine, $l_r$	1600 mm
Visina težišta, $h$	520 mm
Visina središta valjanja prednje/stražnje osovine, $h_1/h_2$	0 mm

Napravljeno je šest različitih simulacija (jedna s osnovnim modelom te pet s po jednim izmijenjenim parametrom), te su izrađeni dijagrami veličina koje opisuju karakteristike upravljivosti pri ustaljenoj vožnji zavojem. Izmjene utjecajnih parametara prikazane su u Tablica 8.

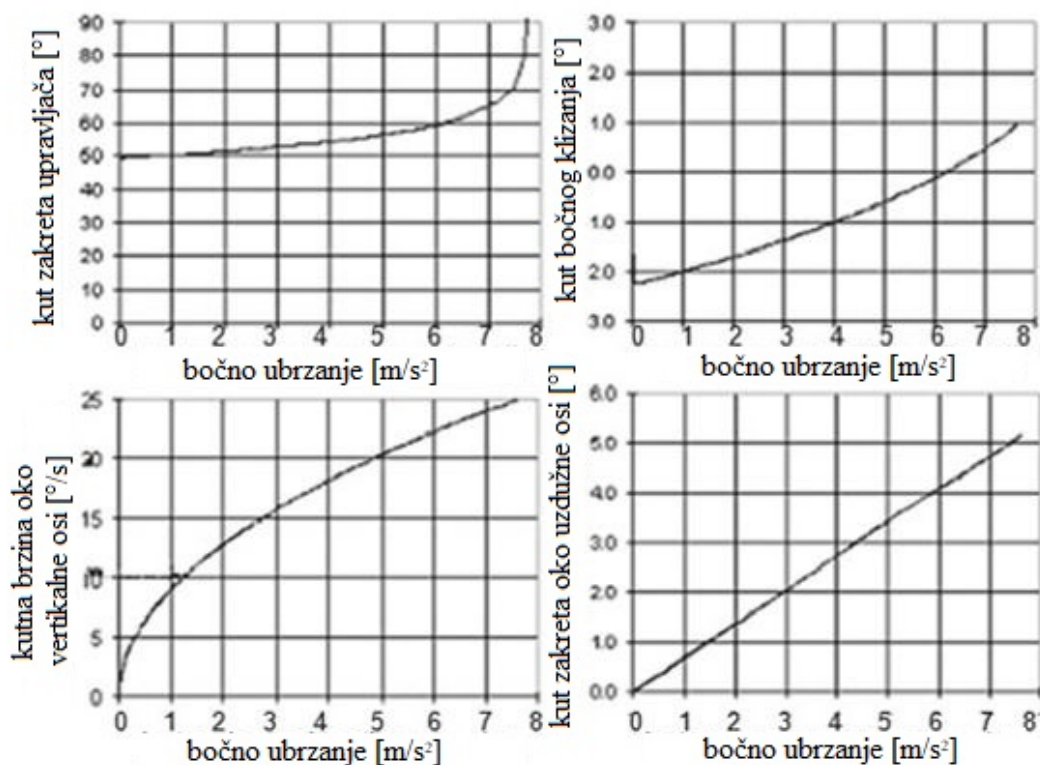
**Tablica 8. Izmjena parametara u simulaciji**

Izmijenjena veličina	Izmijenjena vrijednost
Visina težišta, $h$	0 mm
Uzdužna koordinata težišta	Prema stražnjoj osovini, i dalje s prednje strane polovine međuosovinsko razmaka $l$
Visina središta valjanja prednje osovine, $h_1$	150 mm
Krutost torzijske osovine prednjeg ovjesa	Povećana u odnosu na početnu
Konfiguracija pogona	Stražnji pogon



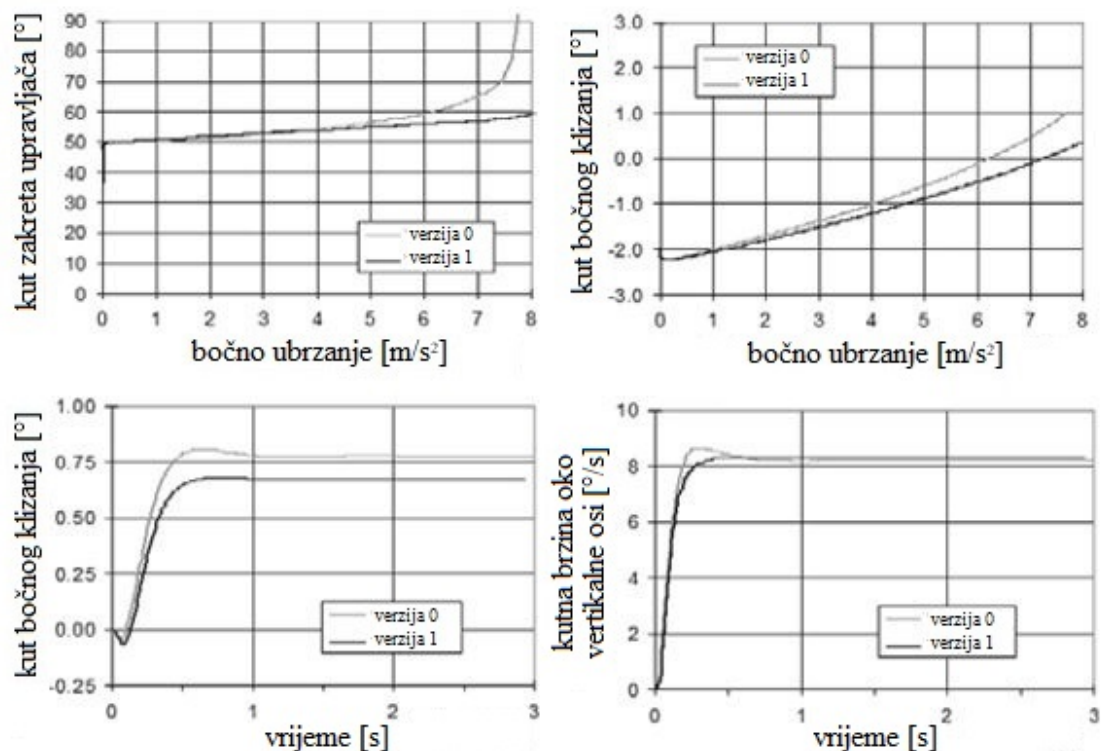
### 3.2.3. Rezultati simulacija

Rezultati simulacija prikazani su dijagramski, kao funkcija bočnog ubrzanja vozila. Promatrane veličine korištene za opisivanje ponašanja vozila tijekom ustaljene vožnje zavojem (korištena je metoda konstantnog polumjera) su kut zakreta upravljača, kut bočnog klizanja vozila, kut zakreta oko uzdužne osi te kutna brzina oko vertikalne osi. Osim simulacija ustaljene vožnje zavojem, provedene su i simulacije koračne pobude volana (engl. *step steer input*), te je promatran vremenski odziv kuta bočnog klizanja, kutne brzine oko vertikalne osi, bočnog ubrzanja te kuta zakreta oko uzdužne osi.



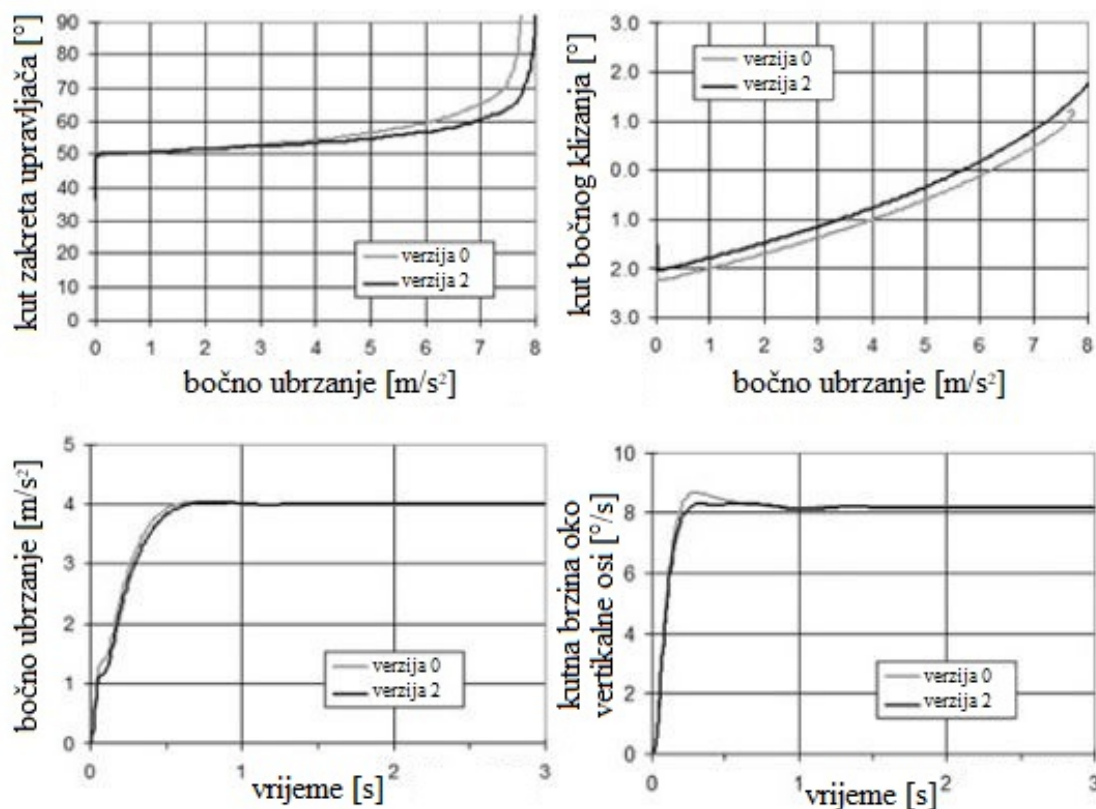
Slika 16. Rezultati simulacija inicijalne konfiguracije [1]

Rezultati simulacije inicijalne konfiguracije vozila prikazani su na Slika 16. Kut zakreta upravljača pri nižim bočnim ubrzanjima raste linearno, dok pri višim doživljava nagli porast što je karakteristika podupravljivog vozila. Da se radi o podupravljivom vozilu također je vidljivo iz dijagrama kutne brzine oko vertikalne osi, gdje ista sporije raste s povećanjem bočnog ubrzanja, što se slaže s tvrdnjama sa Slika 8.



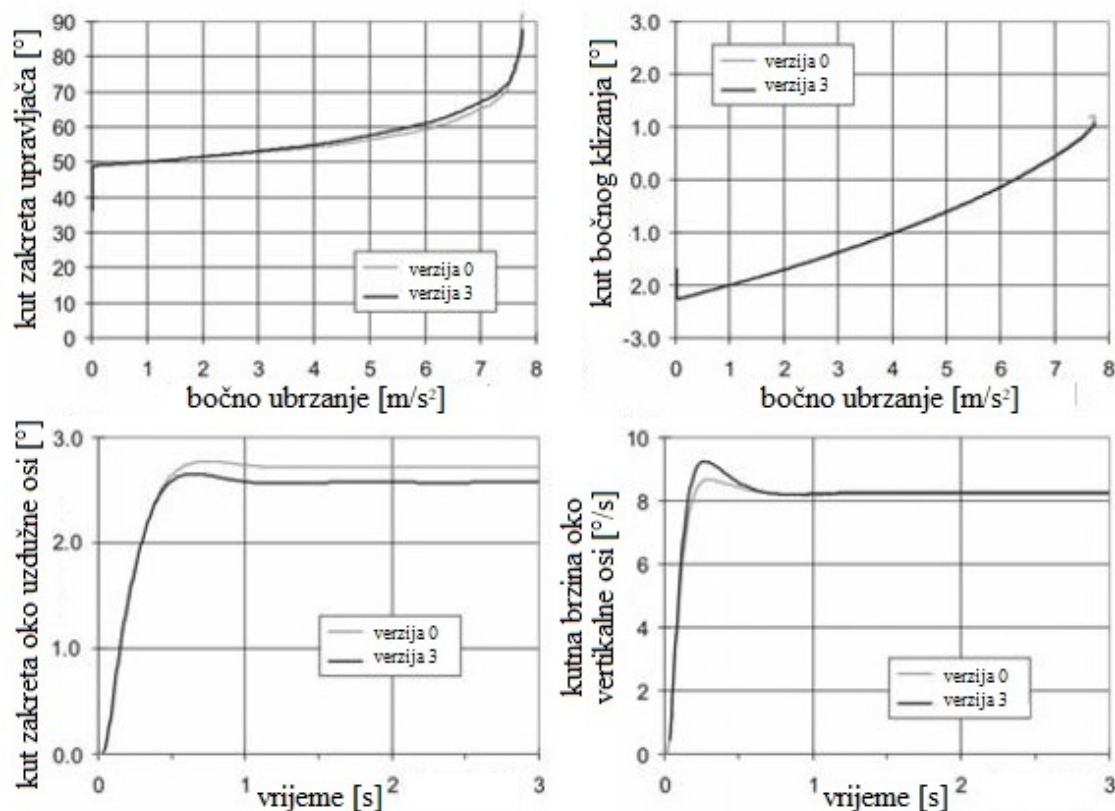
Slika 17. Rezultati simulacija sa sniženim težištem [1]

U odnosu na inicijalnu konfiguraciju, težište je sniženo na razinu kolnika. Time je smanjena preraspodjela opterećenja između vanjskih i unutarnjih kotača, što efektivno povećava bočnu krutost pneumatika [1]. Iz kuta zakreta upravljača sa Slika 17., vidljivo je kako potrebni kut raste linearno cijelim područjem, što ukazuje na uvelike smanjenu podupravljljivost vozila te približavanje neutralnom ponašanju. Upravo radi veće bočne krutosti, porast kuta bočnog klizanja je blaži nego kod inicijalne konfiguracije vozila, te je ono sposobno prenijeti istu bočnu silu za manji kut bočnog klizanja, što je vidljivo iz dijagrama ovisnosti kuta bočnog klizanja o bočnom ubrzanju, kao i u ovisnosti o vremenu. Također, prebačaj kuta bočnog klizanja kao i kutne brzine oko vertikalne osi pri simulaciji koračne pobude volanom gotovo i ne postoji.



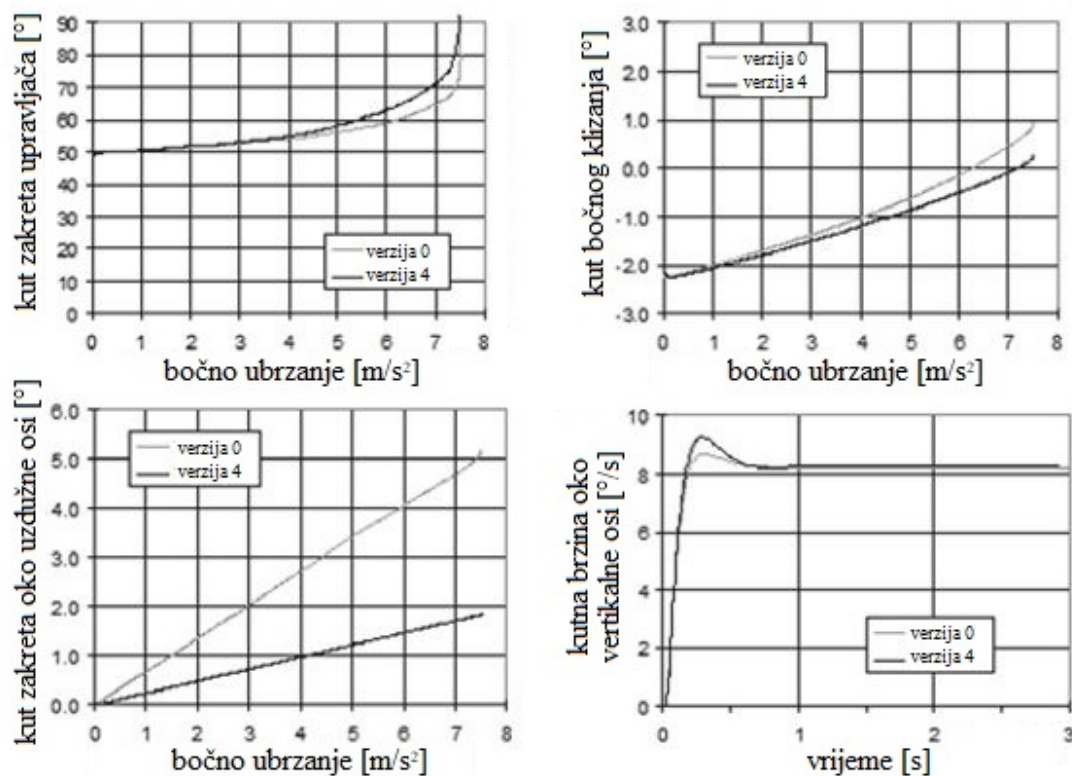
Slika 18. Rezultati simulacija sa težištem pomaknutim prema stražnjoj osovini [1]

Slika 18. prikazuje dijagrame simulacija vozila s pomaknutom uzdužnom koordinatom težišta prema stražnjoj osovini. U odnosu na početnu konfiguraciju, vozilo je i dalje podupravljivo, ali s blagim pomakom prema neutralnom ponašanju, što je vidljivo iz kuta zakreta upravljača, čija krivulja većim rasponom ima približno linearnu ovisnost o bočnom ubrzanju. Krivulja kuta bočnog klizanja ima jednaku promjenu kao i inicijalna konfiguracija, uz pomaknutu početnu vrijednost. Kod dijagrama dobivenih simulacijom koračne pobude volana nema razlike uspoređujući s početnim parametrima vozila, osim u iznosu prebačaja kutne brzine oko vertikalne osi.



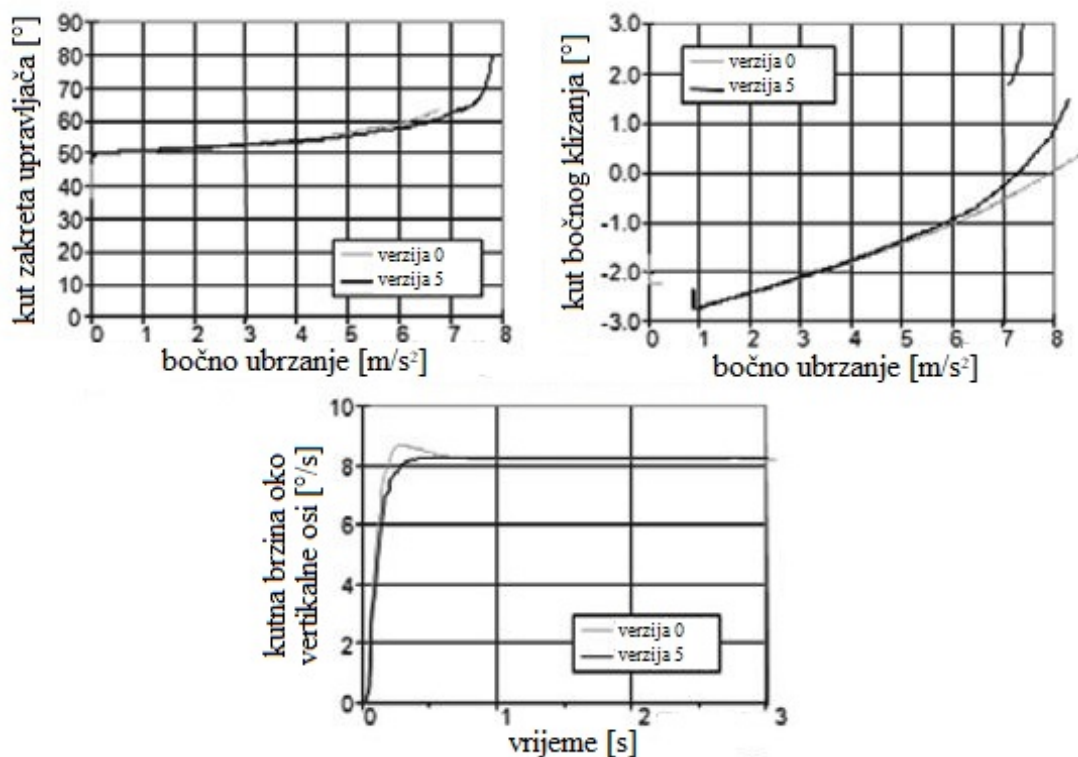
Slika 19. Rezultati simulacija s povišenom osi valjanja vozila [1]

Treći izmijenjeni parametar na vozilu je povišenje središta valjanja prednje osovine s razine kolnika na visinu od 150 mm. Os valjanja vozila time poprima nagib prema dolje gledajući s prednje prema stražnjoj strani vozila, iako to nije u skladu s preporukama pri konstruiranju vozila. Vidljivo sa Slika 19., nema razlike u rezultatima simulacije ustaljene vožnje kod potrebnog kuta zakreta upravljača niti kod promjene kuta bočnog klizanja s povećanjem bočnog ubrzanja vozila. Kod koračne pobude volana, vidljiva je razlika u kutu zakreta oko središnje osi, gdje vozilo s izmijenjenim parametrima poprima nešto nižu vrijednost (otprilike 2,5° u odnosu na 2,7° kod inicijalne konfiguracije). Razlog tome je manji krak sile na os valjanja, budući da je visina težišta ostala nepromijenjena. Ustaljena vrijednost kutne brzine oko vertikalne osi ostaje nepromijenjena, uz izraženiji prebačaj pri dosezanju iste (otprilike 9,2 °/s naspram 8,6 °/s).



Slika 20. Rezultati simulacija s povećanom torzijskom krutosti prednje osovine [1]

Četvrti slučaj izmjene parametara podrazumijeva povećanje krutosti torzijske osovine prednjeg ovjesa. Povećanje torzijske krutosti osovine za posljedicu ima povećanje preraspodjele opterećenja kotača iste, što smanjuje bočnu krutost osovine [1]. Utjecaj je stoga vidljiv na Slika 20., gdje kut zakreta upravljača ranije gubi linearnu ovisnost o bočnom ubrzanju vozila, te je ono podupravljivije nego inicijalna konfiguracija. Kut bočnog klizanja vozila poprima blaži porast, što također pokazuje da se radi o povećanju podupravljivosti vozila. Značajna razlika u odnosu na početni model vidljiva je na dijagramu kuta zakreta vozila oko uzdužne osi, gdje je postignuto značajno smanjenje zakretanja vozila. Vršna vrijednost početnog vozila iznosi malo preko 5°, dok kod vozila s izmijenjenom torzijskom krutosti prednje osovine ne prelazi 2° pri najvećem bočnom ubrzanju. Kutna brzina oko vertikalne osi pri koračnoj pobudi volana poprima jednaku ustaljenu vrijednost, uz povećanje prebačajne vrijednosti.



Slika 21. Rezultati simulacija konfiguracije sa stražnjim pogonom [1]

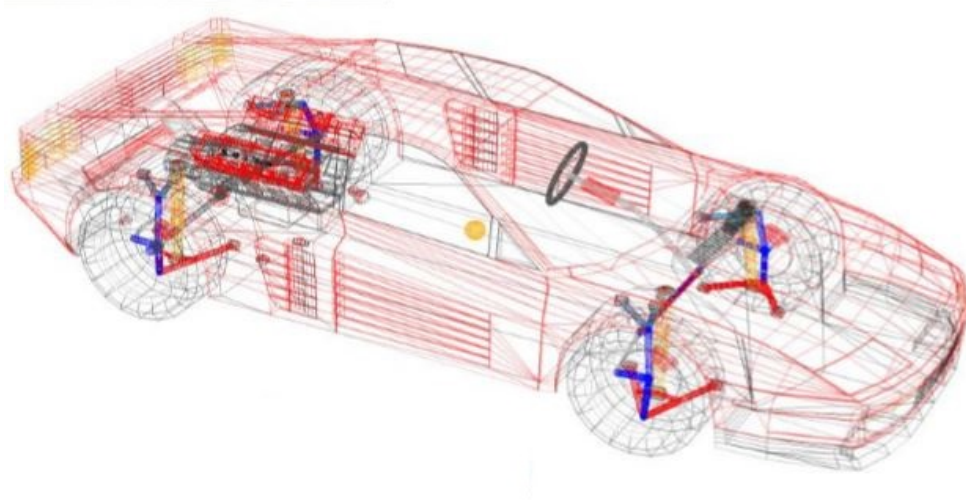
Posljednji izmijenjeni parametar, čiji su dijagrami rezultata simulacija prikazani na Slika 21., je izmjena konfiguracije pogona. Iako se radi o vozilu s pogonom stražnjim kotačima, iz dijagrama kuta zakreta upravljača vidljivo je kako se radi o podupravljivom vozilu s krivuljom sličnom onoj inicijalne konfiguracije vozila. Promatranjem dijagrama kuta bočnog klizanja, čija vrijednost pri većim vrijednostima bočnog ubrzanja naglo poraste, te uspoređujući s dijagramom prikazanim na Slika 9. i Bergmannovom definicijom podupravljivosti / preupravljivosti sa Slika 7. može se zaključiti da vozilo pri visokim vrijednostima bočnog ubrzanja pokazuje tendenciju prelaska u preupravljivo stanje. Takvo stanje objašnjava se s većim smanjenjem bočne krutosti stražnje osovine u odnosu na prednju, upravo iz razloga što u ovom slučaju stražnja osovina, osim bočnih, prenosi i uzdužne, odnosno pogonske sile. Na smanjenje bočne krutosti obje osovine također utječe preraspodjela opterećenja unutarnjih i vanjskih kotača. U dijagramu kutne brzine oko vertikalne osi razlika između konfiguracija pogona je zanemariva, osim glaedeg prelaska u ustaljenu vrijednost kod konfiguracije vozila sa stražnjim pogonom. Slika 9



### 3.3. Multibody simulacijski model vozila

#### 3.3.1. Složenost multibody modela

*Multibody* model vozila temelji se na dinamici sustava više tijela. Cijeli sustav sastavljen je od velikog broja krutih i fleksibilnih tijela, povezanih elementima kinematskih ograničenja te elementima za povezivanje (krutim i elastičnim zglobovima, opružno-prigušnim elementima, itd.) [5]. Dozvoljeni pomaci, rotacije te deformacije određenih tijela su veliki, te se koriste nelinearne karakteristike opružno-prigušnih elemenata. Mogućnosti *multibody* modela su analiza kinematike i dinamike raznih sustava vozila (ovjesa, transmisije, itd.) te dinamike kompletnog vozila. Klasični model omogućava analizu opterećenja, naprezanja i pogonske čvrstoće, vibracijsku analizu te optimiziranje geometrije dijelova i sustava.



Slika 22. Multibody model vozila [10]

Za analizu dinamike kompletnog vozila koristi se specijalizirani *multibody* model vozila. Specijalizirani model omogućava predviđanje i razumijevanje ponašanje vozila te identifikaciju ključnih parametara kroz nekoliko simulacija, što je i najveća prednost *multibody* modela. Modeli vozila sastoje se od 50 – 100 stupnjeva slobode gibanja, te je računanje vrlo brzo te omogućava primjenu u realnom vremenu.

### 3.3.2. Korišteni modeli vozila

Simulacije s *multibody* modelom provedene su unutar [11]. Korišteni alat za provođenje simulacija je MATLAB uz korištenje Simulink dodatka. Za kreiranje modela vozila korišten je zasebni softverski paket SIMPACK, te je povezivanje modela sa simulacijskom okolinom provedeno ko-simulacijom, u kojoj svaki softverski paket rješava jednačbe postavljene u istom, te nakon toga izmjenjuju podatke na temelju kojih kreću u daljnji proračun. Provedene su simulacije korištenjem modela koji su bazirani na testnim vozilima – Mercedes-Benz A-klasa te BMW 330xi. Vrijednosti potrebnih parametara određene su eksperimentalno, mjerenjem na testnim vozilima. Budući da se radi o *multibody* modelu vozila, potrebno je uz osnovne parametre (međuosovinski razmak, širine traga kotača, masa vozila, itd.) poznavati i momente inercije oko glavnih osi, kinematske točke ovjesa, karakteristike opruga i amortizera te druge potrebne veličine.

### 3.3.3. Mercedes-Benz A-klasa

Na Sliku 23. prikazan je simulacijski model za Mercedes-Benz A-klasu. Vozilo je pogonjeno prednjim kotačima, te se sprijeda nalazi McPhersonov ovjes, dok je stražnji ovjes polukruta spregnuta osovina.



Slika 23. Simulacijski model za Mercedes-Benz A-klasu [11]



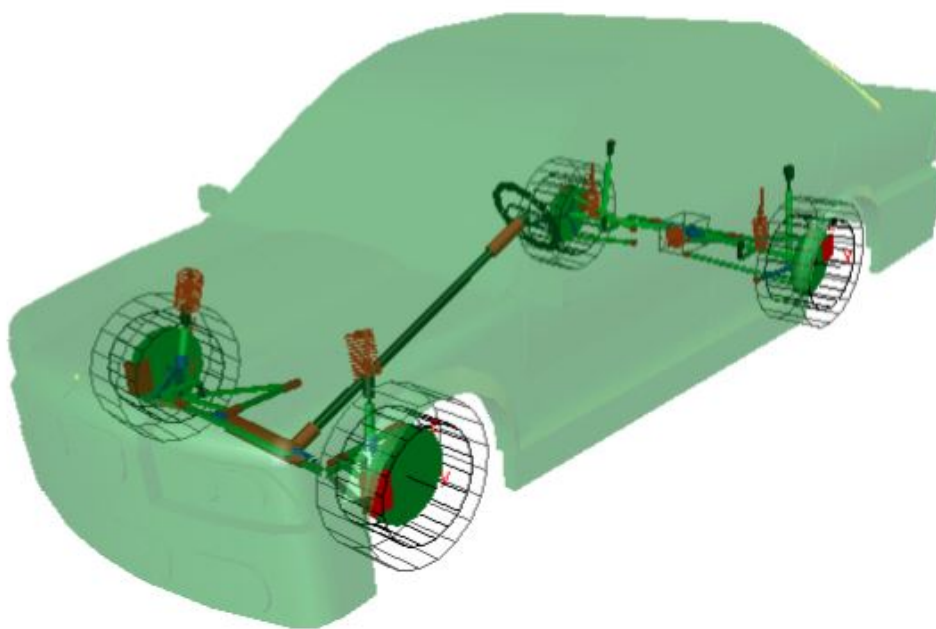
Za definiranje *multibody* modela potreban je veliki broj parametara, a u Tablica 9. navedeni su samo osnovni parametri i njihove vrijednosti. U okviru istraživanja unutar [11] nije provedena izmjena parametara, već je simulacijski model validiran s ispitivanim modelom. Osim simuliranja prolaska vozila (ustaljene vožnje) zavojem, provedene su i simulacije dvostruke izmjene pravca te naglog povećanja kuta zakreta upravljača.

**Tablica 9. Vrijednosti osnovnih parametara za Mercedes-Benz A klasu**

Parametar	Vrijednost
Međuosovinski razmak, $l$	2423 mm
Širina traga prednjih kotača, $S_f$	1492 mm
Širina traga stražnjih kotača, $S_r$	1426 mm
Dinamički polumjer kotača, $r_{din}$	280 mm
Masa vozila, $m$	1245 kg
Udaljenost između težišta i prednje osovine, $l_f$	1100 mm
Udaljenost između težišta i stražnje osovine, $l_r$	1323 mm
Visina težišta, $h$	580 mm
Moment inercije oko uzdužne osi, $I_x$	335 kgm <sup>2</sup>
Moment inercije oko poprečne osi, $I_y$	1095 kgm <sup>2</sup>
Moment inercije oko vertikalne osi, $I_z$	1200 kgm <sup>2</sup>

### 3.3.4. BMW 330xi

Slika 24. prikazuje simulacijski model vozila BMW 330xi. Radi se o vozilu s trajnim pogonom na sva četiri kotača. Iako je vozilo pogonjeno svim kotačima, transmisija na prednju osovину šalje otprilike jednu trećinu okretnog momenta. Iz tog razloga, vozilo je modelirano kao pogonjeno samo stražnjim kotačima.



Slika 24. Simulacijski model za BMW 330xi [11]

Pri modeliranju vozila, neke od parametara (npr. momenti inercije manjih komponenata) nije bilo moguće egzaktno odrediti, te su stoga takve veličine aproksimirane. Također, vozila su modelirana čisto kinematički, bez ikakvih elastokinematičkih elemenata.

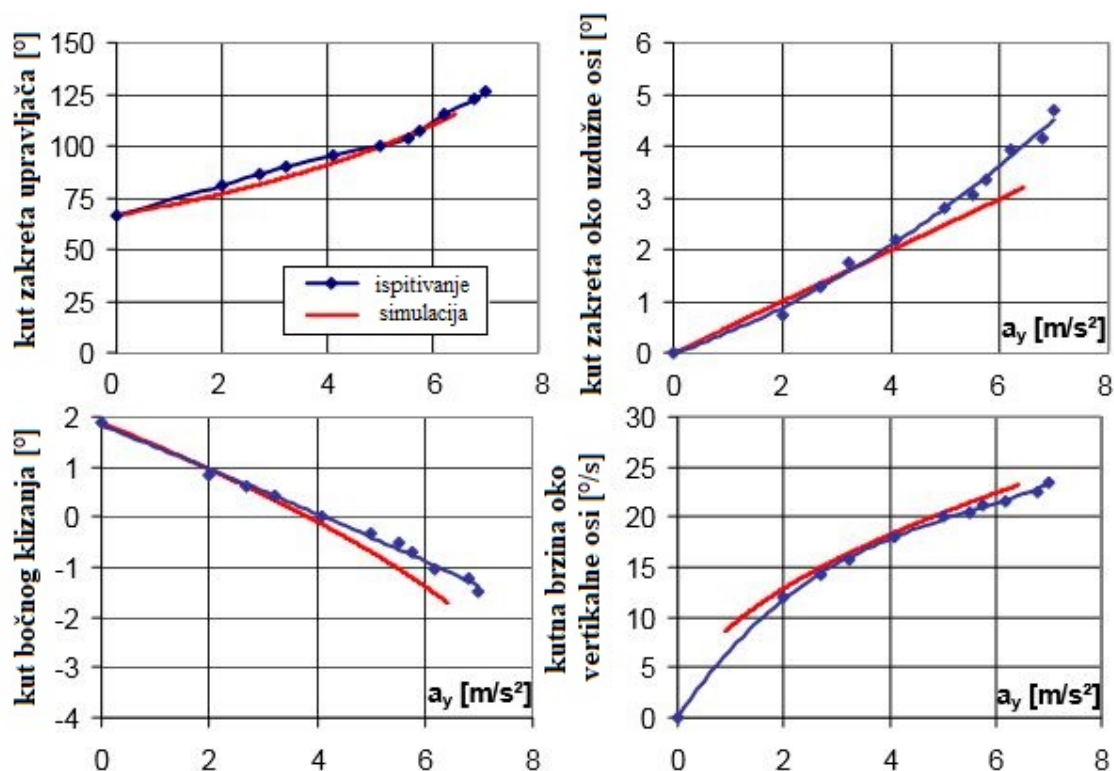
Kao i kod prethodnog modela, s prednje strane nalazi se McPhersonov ovjes, dok je straga multilink ovjes. Tablica 10. prikazuje vrijednosti osnovnih parametara vozila BMW 330xi potrebnih za provođenje simulacije. U odnosu na prvo vozilo, primjećuje se značajno veća masa vozila, uzdužni položaj težišta pomaknutiji prema stražnjoj osovini te snižena visina težišta. Također, širina traga kotača veća je na stražnjoj osovini, što prema Tablica 4. doprinosi podupravljivom ponašanju vozila.

**Tablica 10. Vrijednosti osnovnih parametara za BMW 330xi**

Parametar	Vrijednost
Međuosovinski razmak, $l$	2725 mm
Širina traga prednjih kotača, $S_f$	1471 mm
Širina traga stražnjih kotača, $S_r$	1478 mm
Dinamički polumjer kotača, $r_{din}$	300,5 mm
Masa vozila, $m$	1725 kg
Udaljenost između težišta i prednje osovine, $l_f$	1365 mm
Udaljenost između težišta i stražnje osovine, $l_r$	1360 mm
Visina težišta, $h$	493 mm
Moment inercije oko uzdužne osi, $I_x$	510 kgm <sup>2</sup>
Moment inercije oko poprečne osi, $I_y$	2280 kgm <sup>2</sup>
Moment inercije oko vertikalne osi, $I_z$	2730 kgm <sup>2</sup>

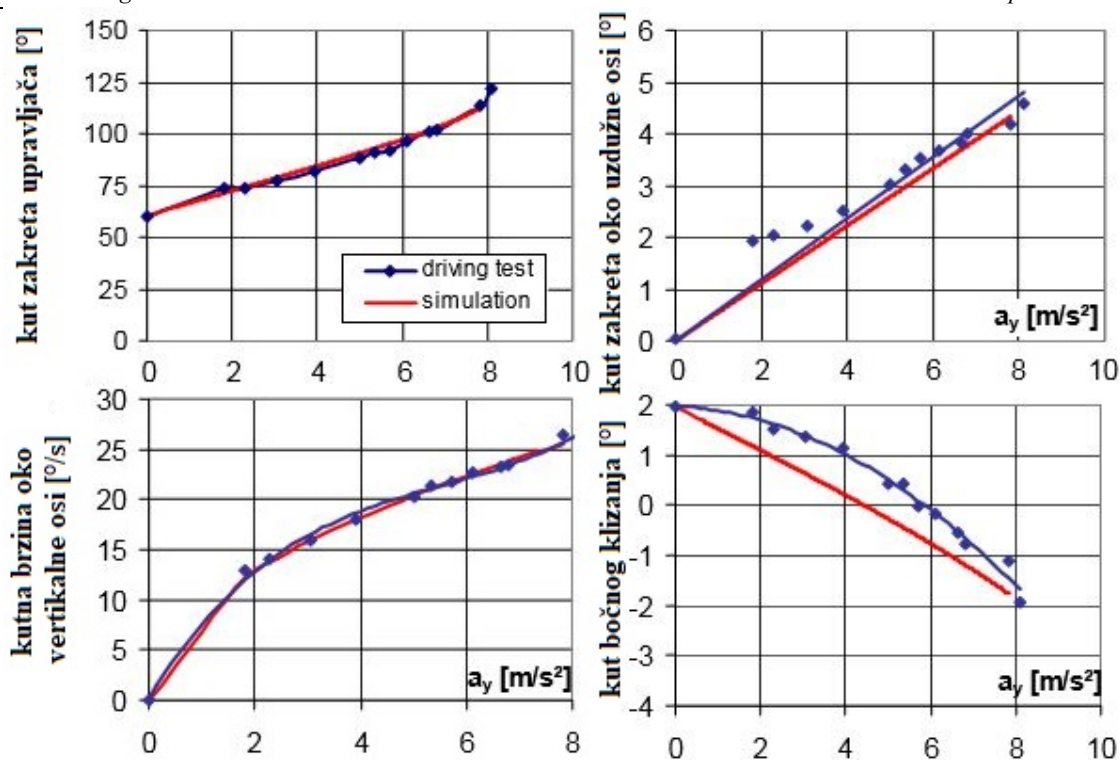
### 3.3.5. Rezultati simulacija

Ispitivanje je provedeno kružnom poligonu, metodom konstantnog polumjera, na suhoj podlozi te bez korištenja ESP-a (DSC-a). Polumjer zavoja iznosi 40 m, te je početna brzina vozila 30 km/h. Brzina je inkrementalno povećavana u koracima od 5 km/h do brzine vozila 50 km/h, a zatim je povećavana u koracima od 2 km/h do najveće brzine pri kojoj je vozilo sposobno pratiti zadanu putanju.



Slika 25. Rezultati ispitivanja i simulacija za Mercedes-Benz A-klasu [8]

Slika 25. prikazuje rezultate ispitivanja i simulacija za Mercedes-Benz A-klasu. Dijagrami ispitivanja stvarne vožnje dobiveni su provlačenjem regresivne krivulje kroz točke koje prikazuju izmjerene vrijednosti. Usporedbom sa rezultatima simulacija vidljivo je vrlo dobro podudaranje pri manjim bočnim ubrzanjima kod kuta zakreta vozila oko uzdužne osi kuta bočnog klizanja vozila. Kod tih veličina do blagog odstupanja dolazi pri bočnom ubrzanju većem od  $4 \text{ m/s}^2$ . Dijagram kuta zakreta upravljača vrlo dobro se podudara kroz cijeli raspon bočnog ubrzanja, dok je kod kutne brzine oko vertikalne osi najveće odstupanje pri vrlo malom bočnom ubrzanju ( $a_y < 2 \text{ m/s}^2$ ). Najveća brzina koju je vozilo ostvarilo iznosi 60 km/h.



Slika 26. Rezultati ispitivanja i simulacija za BMW 330xi [8]

Slika 26. prikazuje dijagramsku usporedbu ispitivanja i simulacija za vozilo BMW 330xi. Uspoređujući krivulje na dijagramima kuta zakreta upravljača, kuta zakreta oko uzdužne osi te kutne brzine vozila oko vertikalne osi, vidljivo je da gotovo i nema razlike između ispitivanja i simulacija. Podudarnost rezultata je odlična kroz cijeli raspon bočnog ubrzanja vozila. Kod dijagrama kuta bočnog klizanja vozila vidljivo je kako dijagram dobiven simulacijom ne prati onaj dobiven ispitivanjem, već su jedine točke podudarnosti na početku i samom kraju ispitivanja odnosno simulacije. Mogući razlog toga je upravo modeliranje vozila kao pogonjenog samo stražnjim kotačima, dok je u stvarnosti pogon na sva četiri kotača. Najveća brzina koju je ostvarilo vozilo BMW 330xi iznosi 64 km/h.

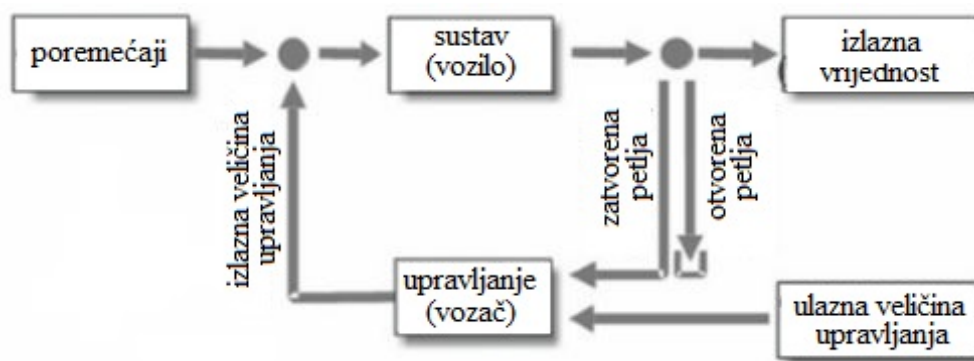
Na temelju rezultata iz literature, slične promijene nastojat će se obuhvatiti i u vlastitim simulacijskim modelima. Koristiti će se ista ispitna procedura (ispitivanje podupravljlivosti / preupravljlivosti metodom konstantnog polumjera) te će biti ispitan utjecaj većeg broja parametara.

## 4. DINAMIČKE KARAKTERISTIKE I OCJENA PONAŠANJA VOZILA

Ocjenjivanje ponašanja vozila i njegove upravljivosti koristi se kako bi se ostvarile poželjne i predvidljive vozne karakteristike kroz cijeli raspon događaja u kojima se vozilo može naći [1]. Kroz cijeli razvojni proces vozila koristi se veliki broj kako subjektivnih, tako i objektivnih metoda ocjenjivanja ponašanja vozila. Ukoliko se ocjenjuje upravljivost, tada se, kako je već navedeno u poglavlju 1, uglavnom koriste objektivne metode ocjenjivanja sa sustavom otvorene petlje u početnim fazama razvoja, dok se subjektivne metode koje uključuju testnog vozača koriste kasnije u razvoju.

### 4.1. Sustavi otvorene i zatvorene petlje

Mjerenja dobivena korištenjem sustava otvorene petlje razlikuju se od onih dobivenih korištenjem sustava zatvorene petlje načinom upravljanja kontrolama vozila. Kod sustava zatvorene petlje, vozač određuje putanju vozila te su mjerenja usmjerena prema međudjelovanju između sustava vozila i vozača koji njima upravlja. Kvaliteta cijelog sustava vozača, vozila i okoline određena je mogućnostima vozača. Kod sustava otvorene petlje, utjecaj vozača je minimaliziran ili u potpunosti uklone, što omogućava ocjenjivanje ponašanja vozila na unaprijed određene ulazne pobude. Metode bazirane na sustavima otvorene petlje omogućavaju uvid u karakteristike samog vozila te njegova fizikalna ograničenja.



Slika 27. Shematski prikaz sustava otvorene i zatvorene petlje [1]

## 4.2. Dinamičke karakteristike propisane ISO 4138 standardom

Standard ISO 4138 navodi nekoliko karakterističnih veličina koje se koriste pri ocjenjivanju upravljivosti vozila nakon provedenih ispitivanja. Međutim, ne navode se kvantitativne vrijednosti koje se smatraju prihvatljivima, ali je moguće pronaći poželjne tendencije kretanja pojedinih krivulja.

### 4.2.1. *Gradijent kuta zakreta upravljača*

Gradijent kuta zakreta upravljača definiran je sljedećom jednačinom:

$$\nabla \delta_H = \frac{\partial(\delta_H)}{\partial(a_y)}. \quad (13)$$

Gradijent kuta zakreta upravljača nije moguće odrediti iz rezultata dobivenih metodom konstantnog kuta zakreta upravljača ukoliko je ispitivanje provedeno korištenjem samo jednog kuta zakreta upravljača. Pri ocjenjivanju ponašanja vozila, poželjno je da promjena kuta zakreta upravljača s porastom bočnom ubrzanja vozila bude linearna kroz što veći raspon bočnog ubrzanja.

### 4.2.2. *Gradijent kuta bočnog klizanja*

Gradijent kuta bočnog klizanja definiran je jednačinom:

$$\nabla \beta = \frac{\partial(\beta)}{\partial(a_y)}. \quad (14)$$

Slika 9. prikazana je promjena kuta bočnog klizanja vozila u ovisnosti o uzdužnoj brzini vozila. Kako bočno ubrzanje vozila izravno ovisi o uzdužnoj brzini vozila, gradijent kuta bočnog klizanja vozila dijagramski izgleda vrlo sličnom onome prikazanim na Slika 9. Prema [12], poželjno je da kut bočnog klizanja opada s porastom bočnog ubrzanja, no ne navodi se kvantitativni iznos promjene koja se smatra prihvatljivom, iako je poželjno da je pad približno linearan uz što manji nagib krivulje. Uz to, može se reći da je poželjna promjena kuta bočnog

klizanja ona koja ne uključuje nagle i nepredvidive skokove vrijednosti, nego se predvidljivo približava granici upravljivosti vozila.

#### 4.2.3. *Gradijent kuta zakreta oko uzdužne osi*

Gradijent kuta zakreta oko uzdužne osi vozila opisan je jednadžbom:

$$\nabla \varphi_v = \frac{\partial(\varphi_v)}{\partial(a_y)}. \quad (15)$$

Osim kao dinamička karakteristika koja utječe na upravljivost, gradijent kuta zakreta oko uzdužne osi vozila bitan je i radi udobnosti vožnje. Kako preraspodjela opterećenja s unutarnjih na vanjske kotača bila što manje, a samim time prenosiva bočna sila s vozila na podlogu što veća, kut zakreta vozila oko uzdužne osi potrebno je minimalizirati. Poželjno je da promjena prati linearnu karakteristiku sa što manjom vršnom vrijednosti, ali na način da nije narušena udobnost, stabilnost te druge karakteristike u ostalim aspektima vožnje.

#### 4.2.4. *Gradijent momenta na upravljaču*

Gradijent momenta na upravljaču definiran je sljedećom jednadžbom:

$$\nabla M_H = \frac{\partial(M_H)}{\partial(a_y)}. \quad (16)$$

Moment na upravljaču indikativna je veličina koja vozaču daje subjektivni osjećaj, odnosno povratnu informaciju, koliko je zahtjevno zadržati vozilo na željenoj putanji kretanja. Unutar [12], navodi se kako je optimalna vrijednost gradijenta pri niskim vrijednostima bočnog ubrzanja između 2 i 3 Nm/m/s<sup>2</sup>. Također, porast momenta poželjan je do određene vrijednosti bočnog ubrzanja, nakon koje bi, prema [1], trebao stagnirati ili opadati kako se vozilo približava granici stabilnosti ili upravljivosti.



#### 4.2.5. *Gradijent zakrivljenosti putanje kretanja*

Gradijent zakrivljenosti putanje kretanja vozila definiran je jednažbom:

$$\nabla\left(\frac{1}{R}\right) = \frac{\partial\left(\frac{1}{R}\right)}{\partial(a_y)}. \quad (17)$$

Gradijent zakrivljenosti putanje kretanja prikazuje promjene putanje kretanja vozila s porastom bočnog ubrzanja. Ova karakteristika indikativna je pri ispitivanju metodama konstantne brzine vožnje te konstantnog kuta zakreta upravljača, dok se za metodu konstantnog polumjera može definirati samo u slučaju ispitivanja korištenjem većeg broja putanja kretanja vozila različitog polumjera. Kako se podupravljivost smatra stabilnim stanjem, a preupravljivost nestabilnim, poželjno je da gradijent promjene zakrivljenosti putanje kretanja bude negativna vrijednost, što znači da s porastom bočnog ubrzanja vozilo povećava svoj polumjer kretanja, što odgovara podupravljivom stanju. Unutar [5] nije kvantitativno navedena prihvatljiva promjena polumjera zakrivljenosti u ovisnosti u bočnom ubrzanju.

#### 4.2.6. *Gradijent kuta zakreta upravljača u ovisnosti o kutu bočnog klizanja vozila*

Gradiejt n kuta zakreta upravljača u ovisnosti o kutu bočnog klizanja vozila definiran je kao:

$$\nabla\delta_H = \frac{\partial(\delta_H)}{\partial(\beta)}. \quad (18)$$

Jedini gradijent koji se ne iskazuje u ovisnosti o bočnom ubrzanju je gradijent kuta zakreta upravljača s promjenom kuta bočnog klizanja vozila. Iako je ovaj gradijent moguće računski dobiti iz gradijenata kuta zakreta upravljača te kuta bočnog klizanja, oboje u ovisnosti o bočnom ubrzanju, unutar [5] se navodi da takva metoda može dovesti do značajnih pogrešaka. Točnije je izravno iscertavanje krivulje ovisnosti kuta zakreta upravljača o kutu bočnog klizanja. Ovaj gradijent, prema [5], može se dovesti u vezu sa subjektivnim doživljajem ponašanja vozila od strane vozača, te ne može biti dobiven metodom konstantnog zakreta upravljača ukoliko je korištena samo jedan vrijednost kuta zakreta.

### 4.3. Ostale dinamičke karakteristike

Osim dinamičkih karakteristika definiranih standardom ISO 4138, unutar [1] i [12] moguće je pronaći i niz drugih karakteristika koje služe za ocjenu upravljivosti vozila. Neke od karakteristika mogu se dobiti korištenjem standardnih ispitnih procedura za ispitivanje podupravljivosti / preupravljivosti, dok su za ostale navedene druge ispitne procedure. Tablica 11. navodi neke od ostalih dinamičkih karakteristika, zajedno s poželjnom smjerom kretanja karakteristike te ispitnom procedurom kojom se ista mjeri.

**Tablica 11. Ostale dinamičke karakteristike**

Dinamička karakteristika	Poželjna promjena karakteristike	Ispitna procedura
Koeficijent proporcionalnosti između kutne brzine oko vertikalne osi i kuta zakreta upravljača	Konstantna vrijednost	Sinusoidalna pobuda / koračna pobuda / ustaljena vožnja zavojem
Područje histereze u faznom dijagramu kuta zakreta upravljača i bočnog ubrzanja	Smanjenje područja histereze	
Područje histereze momenta upravljača u dijagramu momenta upravljača i kuta zakreta upravljača	Smanjenje područja histereze	
Srednji kut zakreta upravljača	Konstantna vrijednost	Ustaljena vožnja zavojem
Koeficijent proporcionalnosti između kuta zakreta upravljača i bočnog ubrzanja	Konstantna vrijednost	Ustaljena vožnja zavojem

Tablica 12., dobivena iz [1], sadrži kriterije za ocjenu upravljivosti vozila te razvojne ciljeve kojima se teži. Neki od kriterija ispituju se procedurama opisanim u [5] te poglavlju 2., dok se drugi ispituju ostalim procedurama za ocjenu upravljivosti koji nisu izravno vezane na podupravljivost / preupravljivost.

**Tablica 12. Subjektivni kriteriji za ocjenu upravljivosti vozila**

Kriterij	Razvojni cilj
Samoupravljaljivost vozila (engl. <i>self-steer</i> )	Predvidljiva zakretanje vozila oko vertikalne osi. Minimalizacija napora potrebnog za održavanje putanje vozila.
Ponašanje pri ulasku u zavoj (engl. <i>turn-in behavior</i> )	Proporcionalna ovisnost kutnog ubrzanja oko vertikalne osi u odnosu na kut zakreta upravljača te kutnu brzinu zakreta upravljača. Minimalni utjecaj prebačaja, faznog te vremenskog kašnjenja za pobudom.
Generiranje bočne sile u pneumaticima	Rapidno generiranje sile, bez faznog pomaka između prednjih i stražnjih kotača.
Generiranje kutne brzine oko vertikalne osi	Proporcionalno brzini zakreta upravljača, bez diskontinuiteta, kašnjenja u fazi ili inercijalnih utjecaja.
Bočno prijanjanje	Maksimalizirana vrijednost, podjednake mogućnosti prijanjanja obje osovine bez utjecaja faktora trenja ili bočnog ubrzanja. Povratna informacija vozaču pri približavanju granice stabilnosti vozila.
Ponašanje pri zakretanje oko uzdužne osi	Minimalizirana vrijednost, proporcionalna bočnom ubrzanju. Kut zakreta oko uzdužne osi treba pružati povratnu informaciju vozaču o iznosu bočnog ubrzanja.
Ponašanje pri preraspodjeli opterećenja	U slučaju naglog puštanja pedale gasa, umjerena vrijednost kutne brzine oko vertikalne osi prema središtu zavoja (engl. <i>lift-off oversteer</i> ). Mogućnost nezahtjevne korekcije kutne brzine oko vertikalne osi.

#### 4.4.

#### 4.5. Normalizacija rezultata

Normalizacija rezultata radi se iz razloga kako bi bilo moguće uspoređivati rezultate vozila koja se značajno razlikuju u nekom od parametara. Također, isti gradijenti dobiveni različitim ispitnim procedurama mogu se razlikovati. Razlog tome je što svaka od metoda na drugačiji način kontrolira iznos bočnog ubrzanja – brzinom, polumjerom kretanja ili kutem zakreta upravljača. Iz tog razloga, usporedivi podaci su oni koji su prikupljeni istom metodom, pri jednakim uvjetima brzine vožnje i polumjera kretanja. Kut zakreta upravljača ne mora biti jednak, iz razloga što se on sastoji od dva dijela – prvi dio proporcionalan je međuosovinskom razmaku (Ackermannov efekt), dok je drugi vezan uz karakteristike upravljivosti vozila. Također, kut zakreta upravljača u odnosu na potrebni kut zakreta kotača ovisan je o ukupnom prijenosnom omjeru upravljačkog sustava. Dvije su veličine koje se uzimaju u obzir pri normalizaciji rezultata:

- Međuosovinski razmak,  $l$ ,
- Prijenosni omjer upravljačkog sustava,  $i_s$ .

##### 4.5.1. Normalizacija u odnosu na prijenosi omjer upravljačkog sustava

Normalizacija rezultata u odnosu na prijenosni omjer upravljačkog sustava koristi se kako bi se usporedili rezultati vozila sličnih iznosa međuosovinskog razmaka, ali velike razlike u prijenosnom omjeru upravljačkog sustava. Veličine nad kojima se provodi normalizacija su gradijent kuta zakreta upravljača u odnosu na bočno ubrzanje te gradijent kuta zakreta upravljača u odnosu na kut bočnog klizanja vozila. Time se dobiju gradijent podupravljivosti te gradijent kuta zakreta kotača u odnosu na bočno klizanje vozila (engl. *understeer/sideslip gradient*). Gradijent podupravljivosti, ovisno o korištenoj metodi, moguće je dobiti na dva načina. Ukoliko se koriste metoda konstantne brzine vožnje ili metoda konstantnog polumjera, tada vrijedi izraz:

$$K = \frac{\partial(\delta_H)}{\partial(a_y)} \cdot \frac{1}{i_s} - \frac{\partial(\delta_D)}{\partial(a_y)}. \quad (19)$$

Desni dio izraza, prema [5], predstavlja gradijent dinamičkog referentnog kuta zakreta upravljača (engl. *dynamic reference steer angle gradient*), što odgovara Ackermannovom kutu zakreta upravljača. Pri korištenju metode konstantnog polumjera, izraz (19) moguće je dodatno skratiti budući da je gradijent Ackermannovog kuta zakreta jednak nuli. Tada izraz za gradijent podupravljivosti glasi:

$$K = \frac{\partial(\delta_H)}{\partial(a_y)} \cdot \frac{1}{i_s}. \quad (20)$$

Pri korištenju metode konstantnog kuta zakreta upravljača, gradijent kuta zakreta upravljača nije definiran, te se gradijent podupravljivosti tada računa iz gradijenta zakrivljenosti putanje kretanja pomnoženim sa međuosovinskim razmakom vozila:

$$K = l \cdot \frac{\partial\left(\frac{1}{R}\right)}{\partial(a_y)}. \quad (21)$$

#### 4.5.2. Normalizacija u odnosu na međuosovinski razmak

Normalizacija rezultata u odnosu na međuosovinski razmak provodi se kako bi bilo moguće usporediti rezultate vozila značajno različitih veličina. Provodi se na način da se gradijent podupravljivosti podijeli sa međuosovinskim razmakom vozila:

$$\frac{K}{l} = \frac{1}{l} \cdot \left( \frac{\partial(\delta_H)}{\partial(a_y)} \cdot \frac{1}{i_s} - \frac{\partial(\delta_D)}{\partial(a_y)} \right). \quad (22)$$

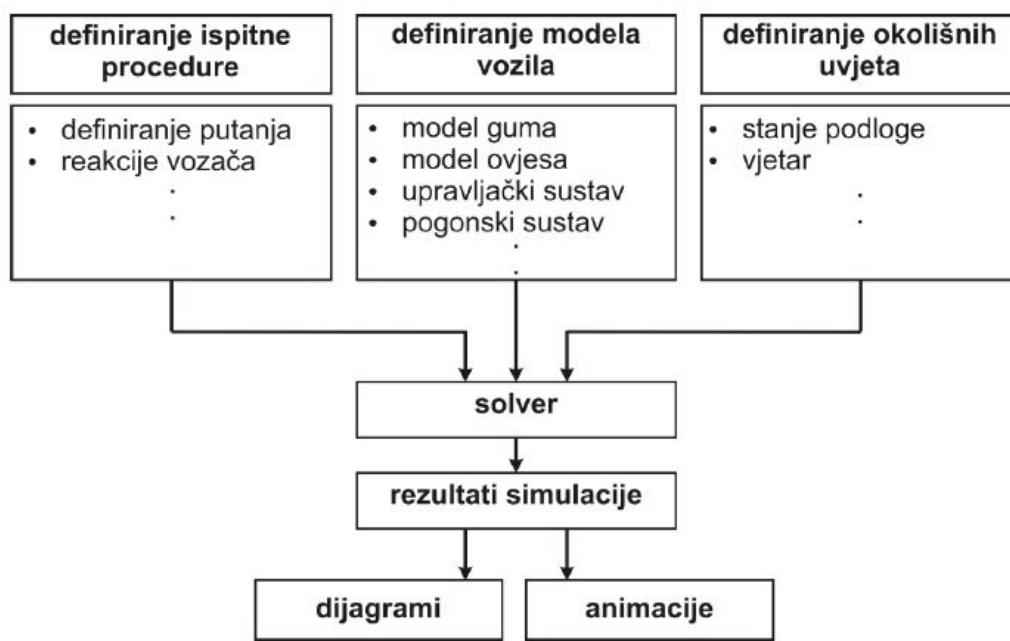
Dobivena veličina naziva se faktor stabilnosti vozila.

## 5. PROVEDENE SIMULACIJE I ANALIZA REZULTATA

Modeliranje vozila te provedba simulacija učinjena je u programskom paketu CarSim. CarSim je jedan od vodećih alata za analizu dinamike vozila, te ga koristi preko 30 proizvođača vozila, preko 110 dobavljača dijelova i sklopova te preko 200 fakulteta i ostalih istraživačkih ustanova. Baziran je na multibody modelima te omogućuje predviđanje i razumijevanje ponašanja vozila kao i identifikaciju ključnih parametara [9].

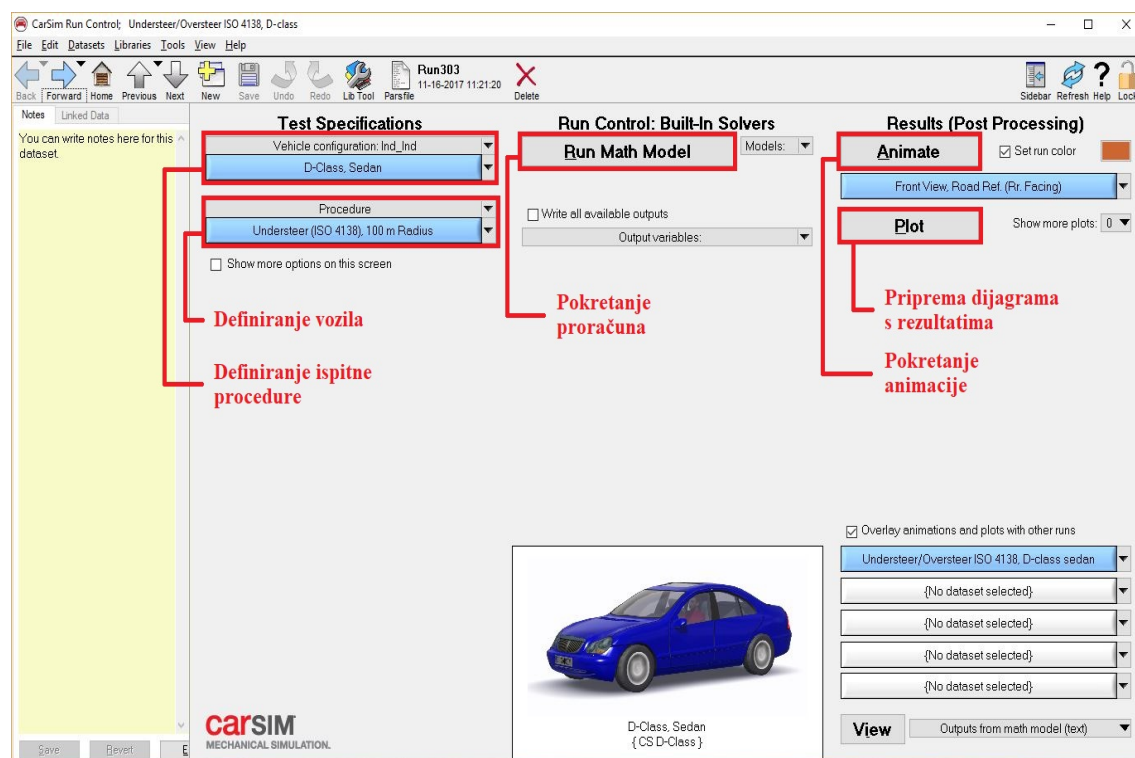
### 5.1. Simulacijski paket CarSim

Programski paket CarSim sadrži modele vozila s više od 55 stupnjeva slobode gibanja. Moguće je definiranje više 300 ulaznih te 700 izlaznih parametara vozila. Modeliranje vozila vrši se zadavanjem parametara raznih podsustava vozila (ovjesa, pogonskog sklopa, upravljačkog sustava, itd.), te je moguće modelirati reakcije vozača, poligone te okolne uvjete. Osim velikog broja postojećih, omogućena je i izrada novih ispitnih procedura. Program je kompatibilan s različitim programima za prikupljanje i analizu podataka, poput Simulinka i LabViewa, te su rezultati dostupni u realnom vremenu.



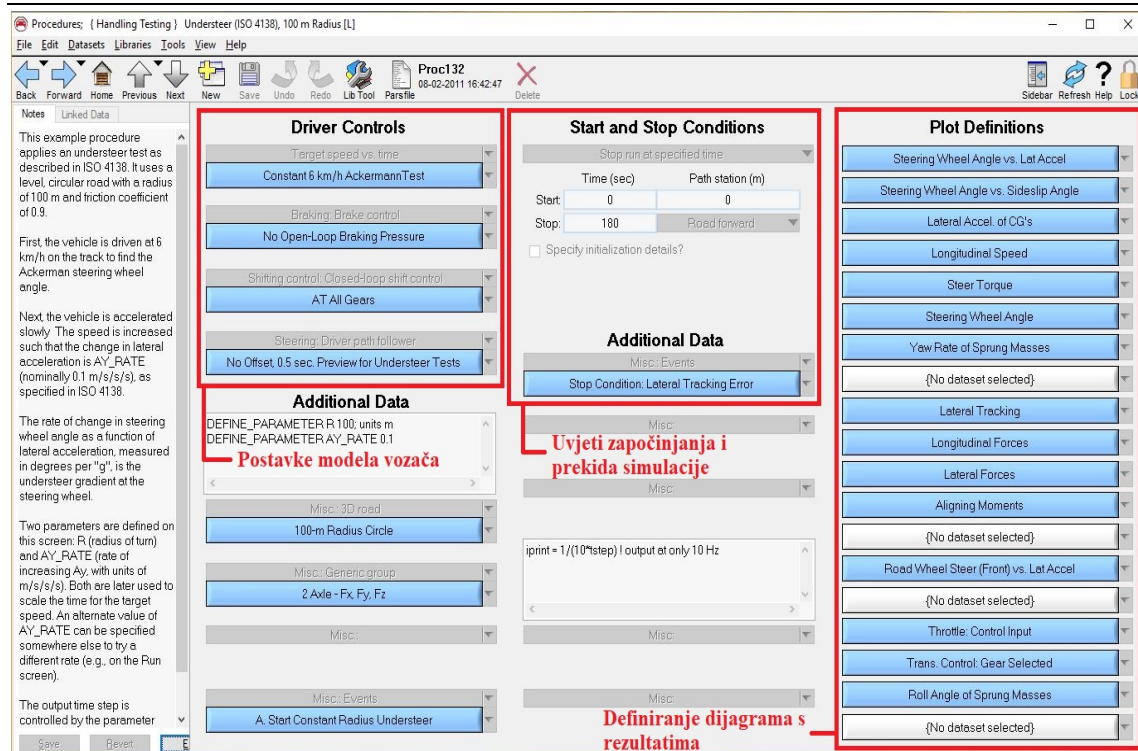
Slika 28. Princip rada CarSim-a [9]

### 5.1.1. Korisničko sučelje i mogućnosti programskog paketa



Slika 29. Osnovni izbornik CarSim-a

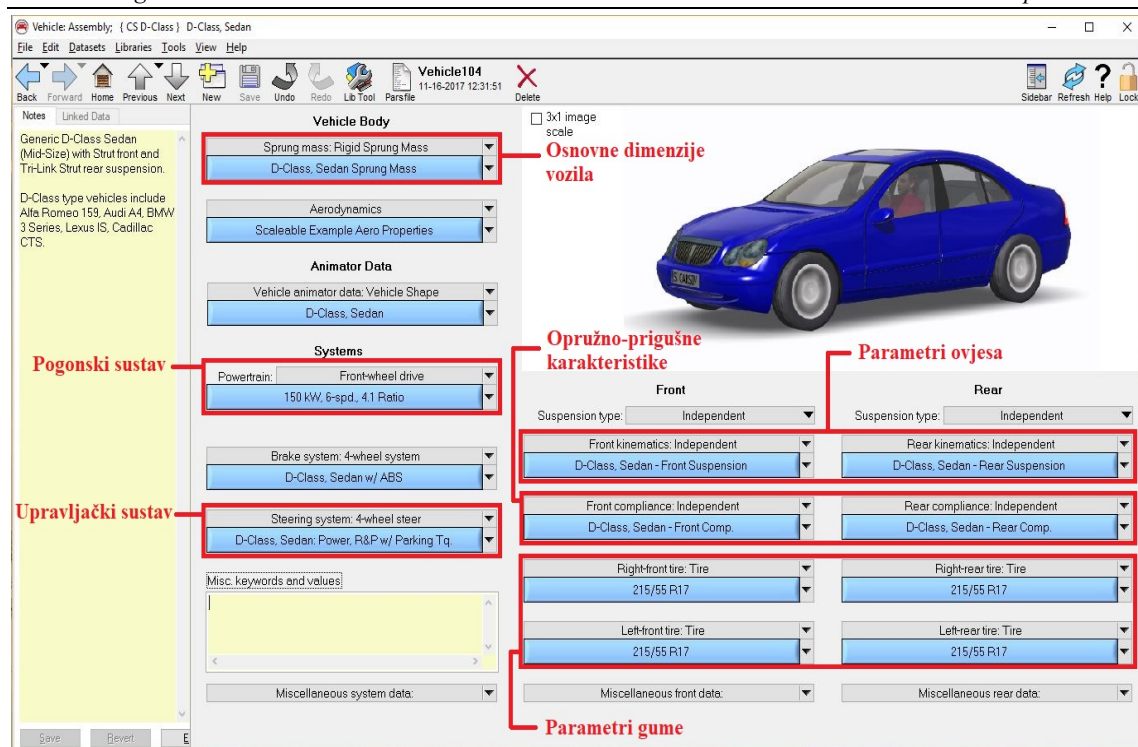
Osnovni izbornik CarSim-a omogućava odabir modela vozila i ispitne procedure iz gotove baze podataka. Izgled osnovnog izbornika prikazan je na Slika 29. Odabirom modela vozila i ispitne procedure moguće je detaljnije definirati podsustave i parametre vozila, odnosno ispitne poligone i uvjete ispitivanja. Osim modela vozila i ispitne procedure, osnovni izbornik sadrži i naredbu za pokretanje simulacije i izračuna traženih veličina, izbornik za odabir i pripremu dijagrama s rezultatima, video-animaciju ispitne procedure te usporedbu rezultata s drugim modelima vozila ili ispitnim procedurama.



Slika 30. Definiranje ispitne procedure

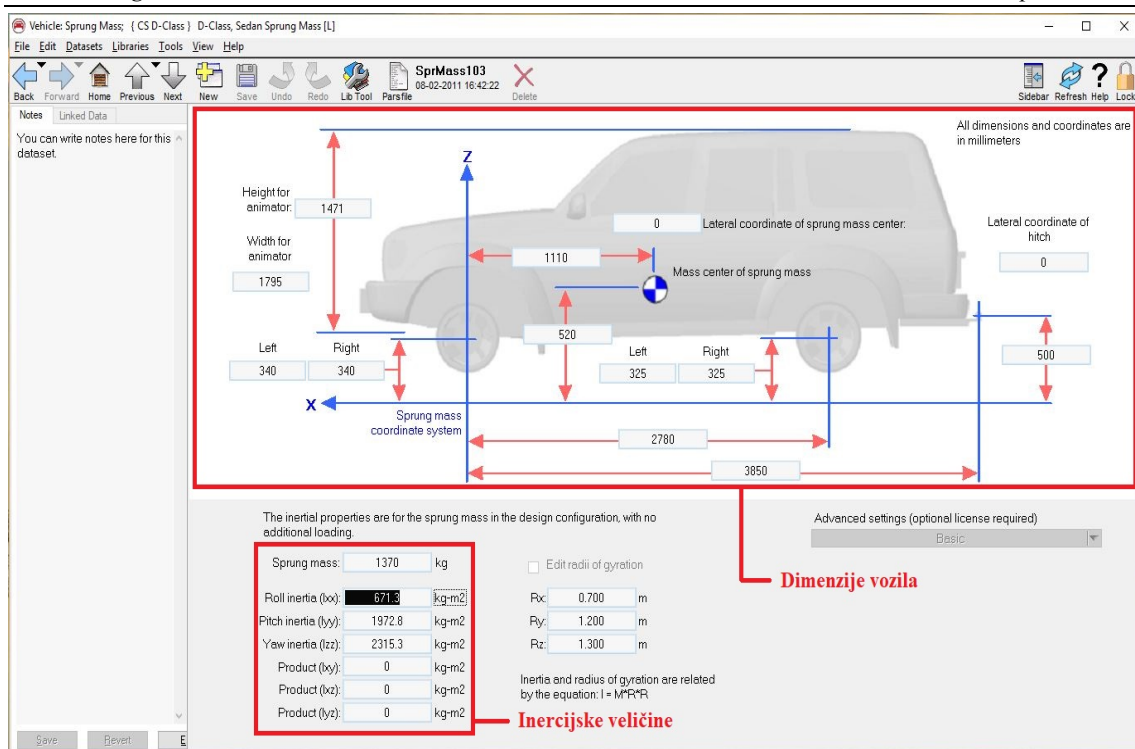
Slika 30. prikazuje izbornik za definiranje ispitne procedure. Izbornik se sastoji od dijelova za podešavanje postavki vozača, uvjeta započinjanja i prekida simulacije te definiranje dijagrama s rezultatima. Također je moguće definirati poligon na kojemu se simulacija izvršava. Pod postavkama modela vozača moguće je podešavati parametre kočenja, prebacivanja stupnjeva prijenosa, upravljanja te ciljane brzine vožnje. Uvjete započinjanja i prekidanja simulacije moguće definiraju se položajem vozila te vremenom pri započinjanju odnosno prekidanju simulacije. Izuzev toga, postoji mogućnost definiranja dodatnih uvjeta prekidanja simulacije. Veličine potrebne za ocjenu ponašanja vozila određuju se u izborniku za definiranje dijagrama s rezultatima.





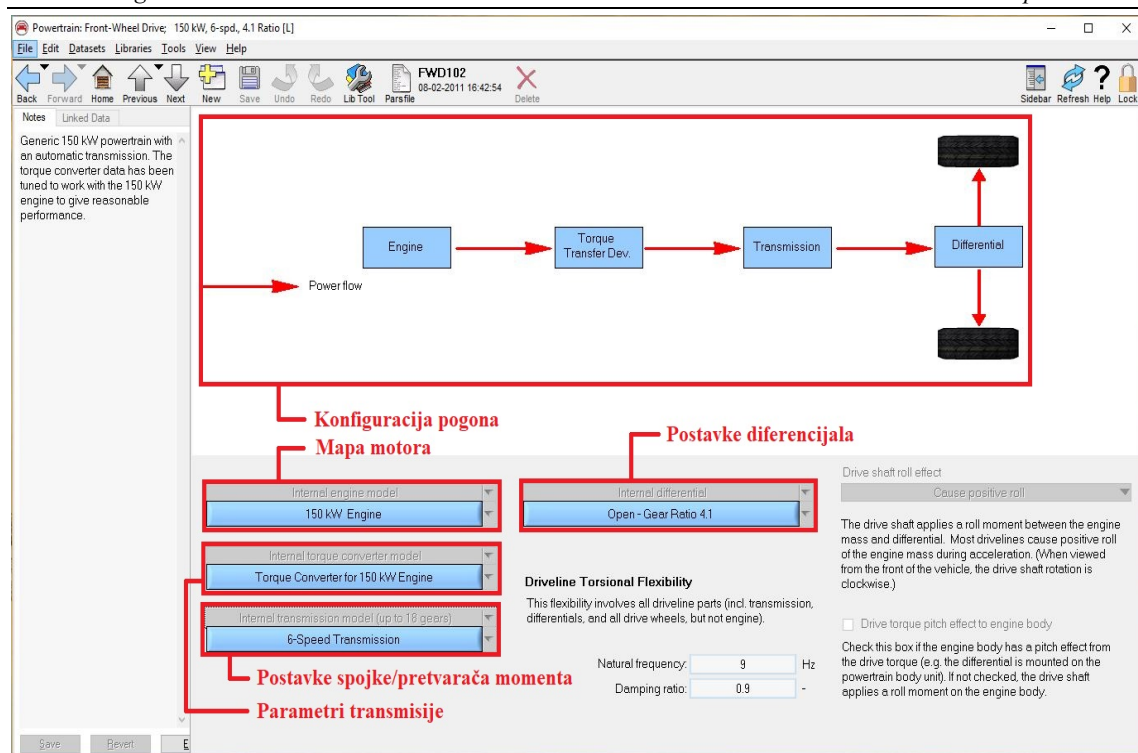
Slika 31. Definiranje sustava vozila

Odabirom izbornika modela vozila, otvara se prozor za definiranje podsustava i parametara vozila. Izbornik je prikazan na Slika 31. Za potrebe provođenja simulacija podupravljlivosti / preupravljlivosti, provedene su izmjene na osnovnim dimenzijama vozila, pogonskom sklopu, upravljačkom sustavu, parametrima ovjesa, opružno prigušnim karakteristikama te parametrima gume. Osim navedenih, moguće je izmijeniti i parametre aerodinamike vozila, parametre kočnog sustava te podatke potrebne za animaciju. Svaki od podsustava na kojima se vrše izmjene parametara biti će prikazan odgovarajućom slikom te detaljnije opisan u nastavku.



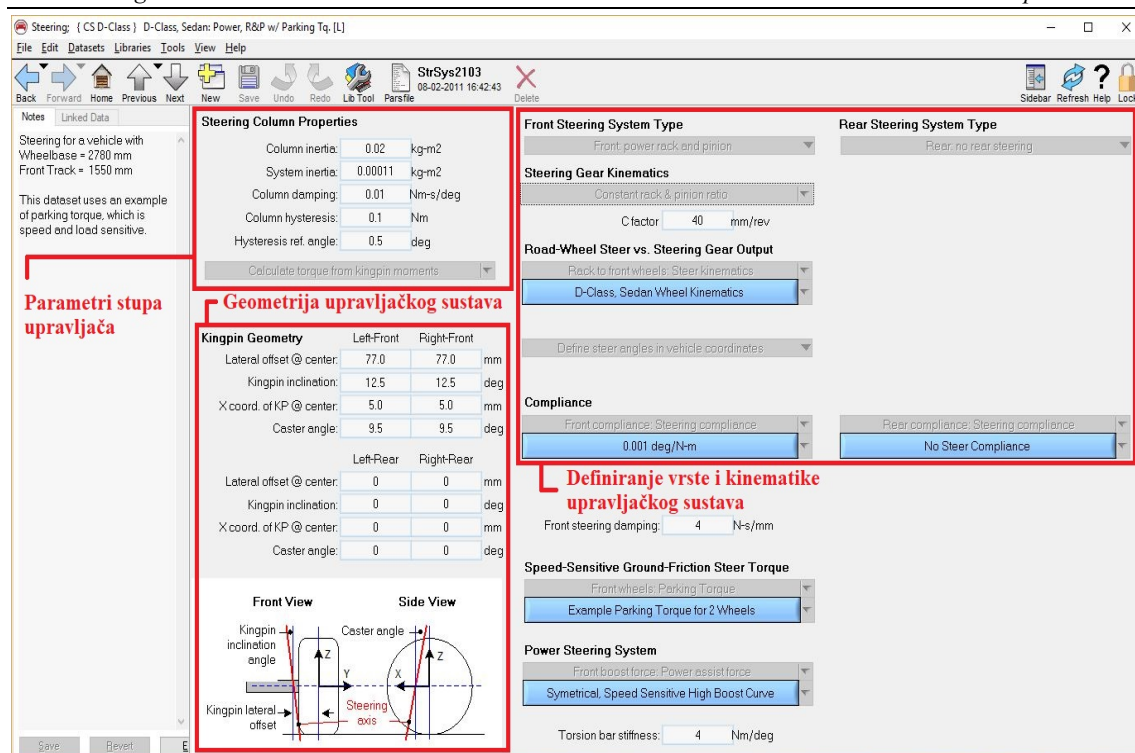
Slika 32. Definiranje osnovnih dimenzija vozila

U izborniku za definiranje osnovnih dimenzija vozila definira se veličina, odnosno dimenzije samog vozila te svojstva ovješene mase. Izbornik je prikazan Slika 32. Dimenzije vozila uključuju položaj težišta u odnosu na sve 3 glavne osi, duljinu međuosovinskog razmaka, položaj kuke, visinu osi rotacije kotača te gabaritne mjere vozila potrebne za animaciju. Inercijske veličine uključuju ukupnu ovješenu masu vozila te momente inercije oko glavnih osi. Momente inercije moguće je definirati na 2 načina – izravno, promjenom vrijednosti željenog momenta inercije, ili definiranjem polumjera, odnosno udaljenosti od osi rotacije. Osnovne dimenzije vozila moguće je dodatno proširiti parametrima torzijske krutosti šasije ili parametrima vezanja motora za šasiju.



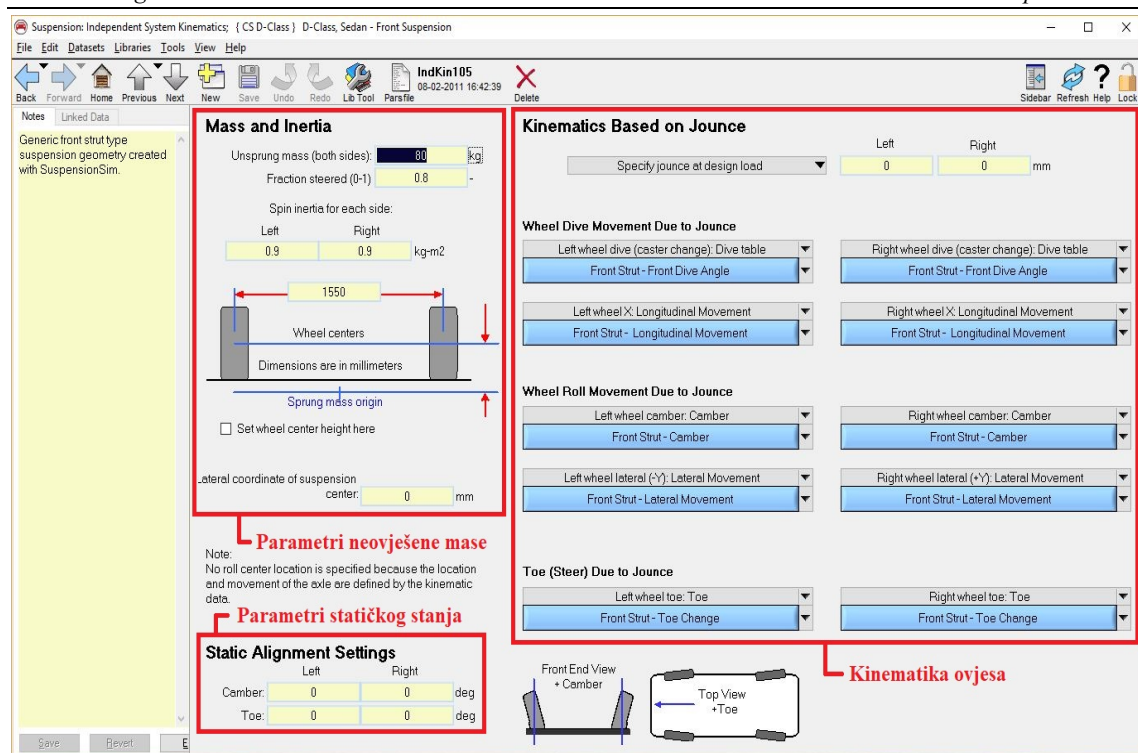
Slika 33. Definiranje pogonskog sklopa

Prozor za definiranje pogonskog sklopa vozila prikazan je na Slika 33. Odabir pogona prednjim, stražnjim ili svim kotačima odabire se u osnovnom izborniku vozila. Pogonski sustav sastoji se od motora, pretvarača okretnog momenta, mjenjača (ručnog ili automatskog) te diferencijalnog prijenosnika. Pod postavkama motora moguće je, osim odabira već gotovih motora iz baze podataka, odrediti promjenu okretnog momenta motora u ovisnosti o brzini vrtnje i opterećenju, brzinu vrtnje u praznom hodu te druge parametre. Definiranje mjenjača zahtjeva podatke o prijenosnim omjerima pojedinih brzina, momente inercije zupčaničkih parova te stupnjeve korisnosti. Ukoliko se radi o automatskom mjenjaču, potrebni su i podaci koji definiraju pretvarač okretnog momenta. CarSim omogućava podešavanje postavki diferencijalnog prijenosnika kao i izmjenu vrijednosti prijenosnog omjera osovine redukcije. Osim otvorenih, alat sadrži unaprijed određene podatke i za nekoliko vrsta samokočnih diferencijalnih prijenosnika.



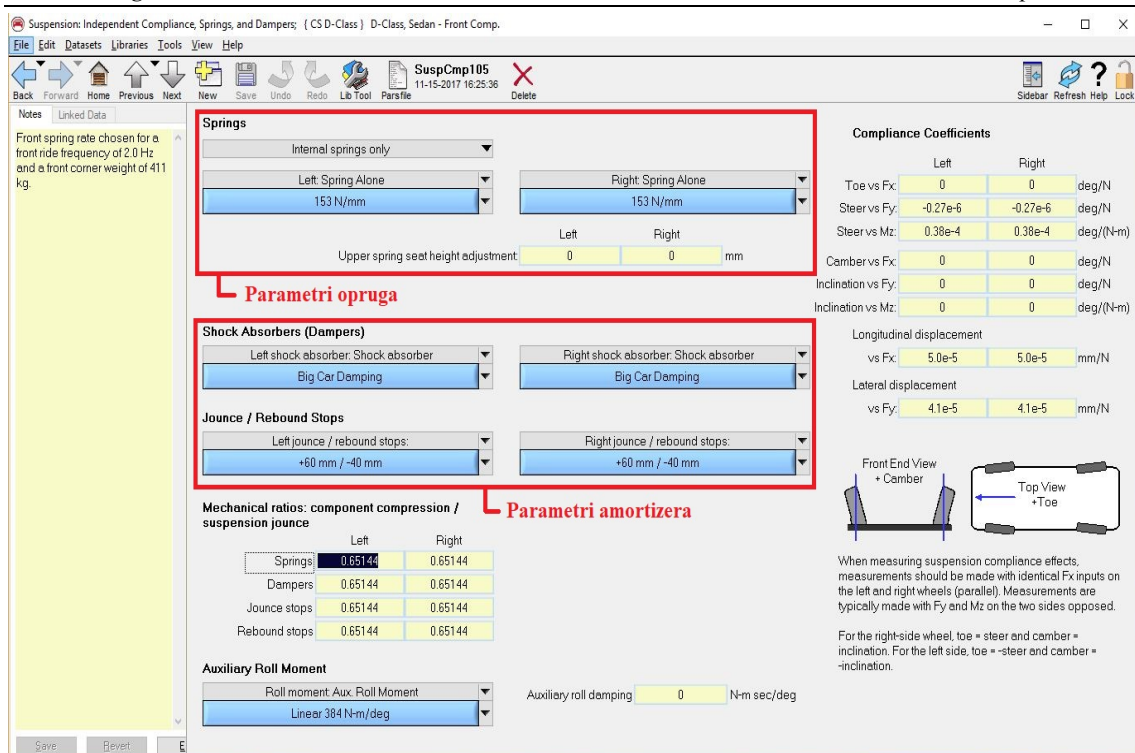
Slika 34. Definiranje upravljačkog sustava

Izbornik za uređivanje skupa podataka vezanog uz upravljački sustav prikazan je na Slika 34. Dostupni modeli upravljačkog sustava jesu sustav sa zubnom letvom te sustav sa navojnim vretenom i kugličnom maticom. Definiranje upravljačkog sustava podijeljeno je na dva dijela – geometrije upravljačkog sustava te postavki stupa upravljača. Kod definiranja geometrije upravljačkog sustava (engl. *kingpin geometry*), tablično se unose podaci za svaki kotač zasebno. Parametri koje je potrebno definirati uključuju bočni odmak od osi vođenja kotača, bočni nagib osi zakretanja kotača, bočna koordinata osi zakretanja u središtu kotača te uzdužni nagib osi zakretanja kotača. U slučaju upravljanja sva 4 kotača, ove parametre potrebno je definirati i za stražnje kotače. Pod postavkama stupa upravljača potrebno je odrediti inercijske i prigušne karakteristike stupa upravljača.



Slika 35. Definiranje parametara ovjesa

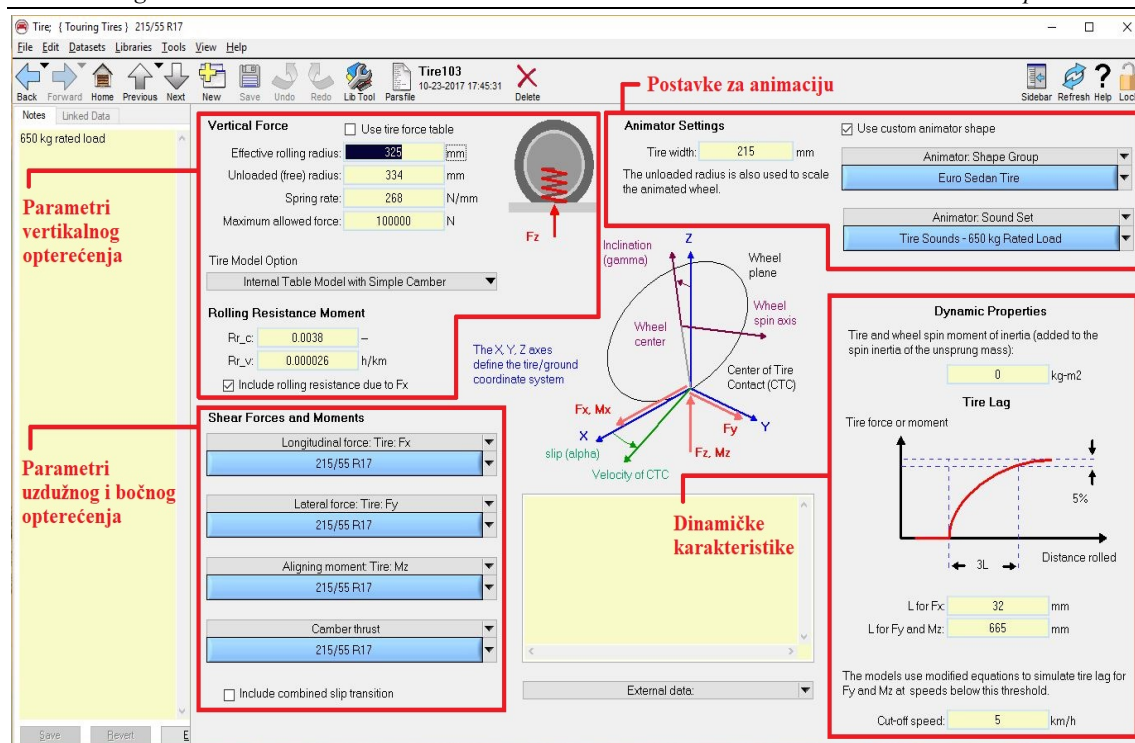
Slika 35. prikazuje izbornik za podešavanje parametara ovjesa vozila. Unutar CarSim moguće je odabrati tri vrste ovjesa – nezavisni ovjes, krutu osovinu te torzijsku osovinu. Pod postavkama parametara neovještene mase definira se sam iznos neovještene mase po osovinu, udio mase koja se zakreće upravljačem, bočna koordinata težišta neovještene mase te širina traga kotača. U parametrima statičkog stanja ovjesa moguće je definirati početne kuteve bočnog nagiba kotača i usmjerenosti kotača. Kinematika ovjesa sadrži dijagrame promjene geometrije ovjesa ovisno o vertikalnom hodu ovjesa.



Slika 36. Definiranje opružno-prigušnih karakteristika

Opružno-prigušne karakteristike definiraju se u izborniku prikazanim na Slika 36. Opruge su definirane konstantnom elastičnosti te karakteristikom, koja može biti linearna ili nelinearna. Osim samo pomoću opruge ovjesa, opružne karakteristike moguće je definirati i pomoću *ride rate* koeficijenta, koji uključuje i krutost pneumatika. Karakteristika amortizera definirana je dijagramom brzine sabijanja amortizera u ovisnosti o sili pobude, te je ovisnost najčešće nelinearna. Ipak, pojednostavljeni model može koristiti linearnu karakteristiku amortizera, zadanu preko jedne numeričke vrijednosti.





Slika 37. Definiranje parametara pneumatika

Definiranje parametara pneumatika prikazano je izbornikom na Slika 37. CarSim sadrži veliki broj unaprijed određenih modela pneumatika, te osim tabličnog sadrži još i Pacejka te MF-Tyre modele. Unutar tabličnog modela, definiraju se parametri vertikalnog, bočnog i uzdužnog opterećenja, dinamičke karakteristike te postavke za animaciju. Parametri vertikalnog opterećenja uključuju karakteristiku krutosti pneumatika, neopterećeni i dinamički polumjer kotrljanja te podatke o faktoru otpora kotrljanja. Dijagrami bočnog i uzdužnog opterećenja prikazuju ovisnost uzdužne sile, bočne sile te stabilizirajućeg momenta o vertikalnom opterećenju i kutu bočnog klizanja kotača. U postavkama za animaciju podešava se širina pneumatika, te izgled i zvuk unutar animacije. Dinamičke karakteristike uključuju inerciju kotača, te zakašnjenje u ostvarenju sile u odnosu na prijedenu udaljenost.

### 5.1.2. Izrada modela vozila

Za provođenje simulacija podupravljivosti / preupravljivosti vozila odabran je model vozila D-segmenta, što po europskoj klasifikaciji vozila odgovara vozilima srednje klase (Opel Insignia, Audi A4, Ford Mondeo i drugi). Parametri čiji će utjecaj biti razmatran, te njihova vrijednost u inicijalnoj konfiguraciji vozila, dani su u Tablica 13. Osim navedenih parametara, promatrat će se i utjecaj konfiguracije pogona. Jednake izmjene parametara provesti će se na vozilu s pogonom na prednjim, stražnjim, te svim kotačima.

**Tablica 13. Vrijednost parametra inicijalne konfiguracije vozila**

Parametar	Početna vrijednost	
Dimenzija pneumatika	215/55/R17	
Uzdužni položaj težišta	1110 mm	
Širina traga kotača	1550 mm	
Bočni nagib kotača	0°	
Konstanta krutosti opruga	153 N/mm	82 N/mm
Usmjerenost kotača	0°	
Uzdužni nagib osi zakretanja kotača	9,5°	
Konstanta krutosti pneumatika	268 N/mm	



Tablica 14. sadrži izmjene utjecajnih parametara u odnosu na inicijalnu konfiguraciju vozila. Izmjene su provedene u oba smjera, s ciljem poticanja što podupravljivijeg te što preupravljivijeg ponašanja vozila. Zasebno su izmjenjene veličine na prednjoj kao i na stražnjoj osovini. Također, promijena parametara izvršena je na način koji bi bio ostvariv pri konstrukciji vozila, odnosno vrijednosti parametara su u skladu s konstrukcijskim preporukama iz [1].

**Tablica 14. Izmjene parametara s ciljem postizanja podupravljivosti / preupravljivosti**

Parametar	Podešavanje na podupravljivost		Podešavanje na preupravljivost	
	Prednja osovina	Stražna osovina	Prednja osovina	Stražnja osovina
Dimenzije pneumatika	215/70/R15	215/55/R17	215/55/R17	215/70/R15
Uzdužni položaj težišta	60 mm	/	/	60 mm
Širina traga kotača	1500 mm	1600 mm	1600 mm	1500 mm
Bočni nagib kotača	1°	-1°	-1°	1°
Konstanta krutosti opruga	189 N/mm <sup>2</sup>	50 N/mm <sup>2</sup>	130,5 N/mm <sup>2</sup>	91 N/mm <sup>2</sup>
Usmjerenost kotača	-30'	30'	30'	-30'
Uzdužni nagib osi zakretanja kotača	10°	/	5°	/
Konstanta krutosti pneumatika	330 N/mm	206 N/mm	206 N/mm	330 N/mm

Kako je broj promatranih utjecajnih parametara velik, te je utjecaj nekih parametara relativno malen, kako bi promjene u dinamičkim karakteristikama vozila bile izraženije, te preglednije i vidljivije u dijagramima s rezultatima, provest će se grupacija parametara u 3 skupine. Skupine su izrađene na način da sadrže parametre koji imaju različitu magnitudu utjecaja (ranije provedenim simulacijama promatran je utjecaj svakog pojedinačnog parametra zasebno, te se pokazalo da najveći utjecaj imaju dimenzija pneumatika, usmjerenost kotača i bočni nagib kotača, potom uzdužni nagib osi zakretanja kotača i širina traga kotača, dok je najmanji utjecaj konstanta krutosti opruga i pneumatika te uzdužni položaj težišta). Grupiranje utjecajnih parametara prikazano je u Tablica 15.

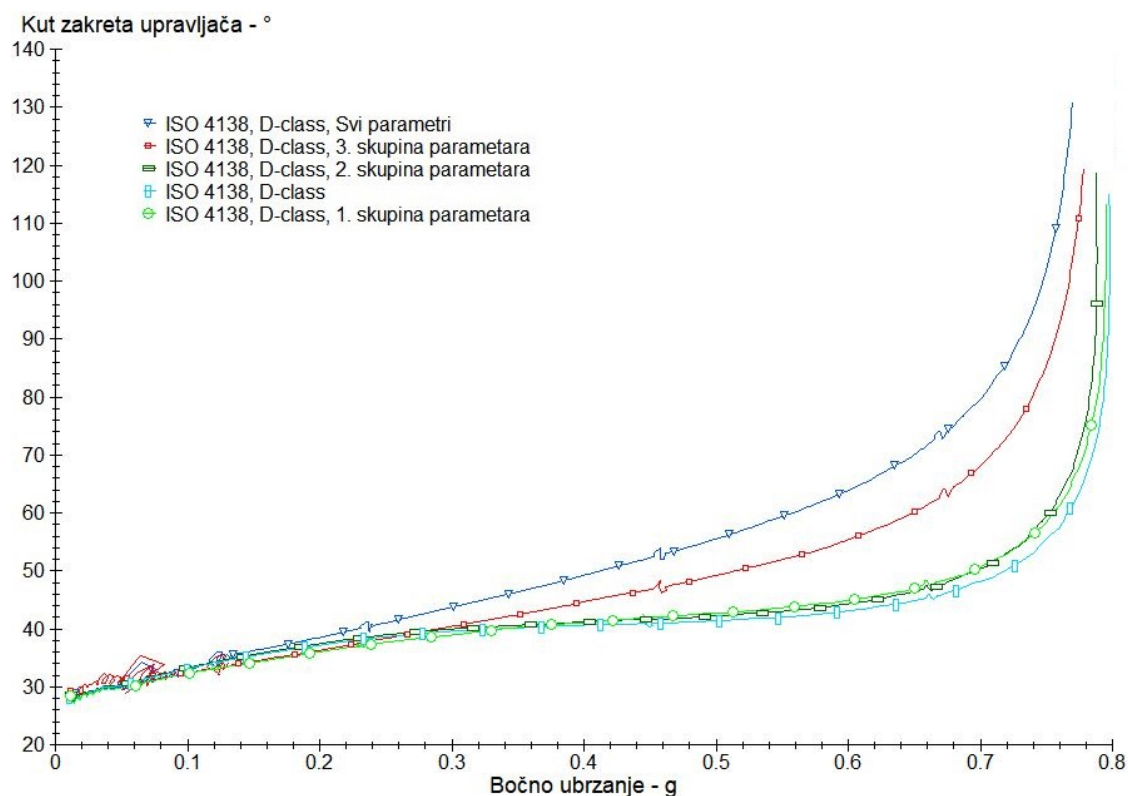
**Tablica 15. Grupiranje utjecajnih parametara**

Skupina parametara	Parametri u skupini
1. skupina parametara	Usmjerenost kotača
	Uzdužni nagib osi zakretanja kotača
2. skupina parametara	Konstanta krutosti opruga
	Konstanta krutosti pneumatika
	Bočni nagib kotača
3. skupina parametara	Uzdužni položaj težišta
	Dimenzija pneumatika
	Širina traga kotača

## 5.2. Rezultati simulacija

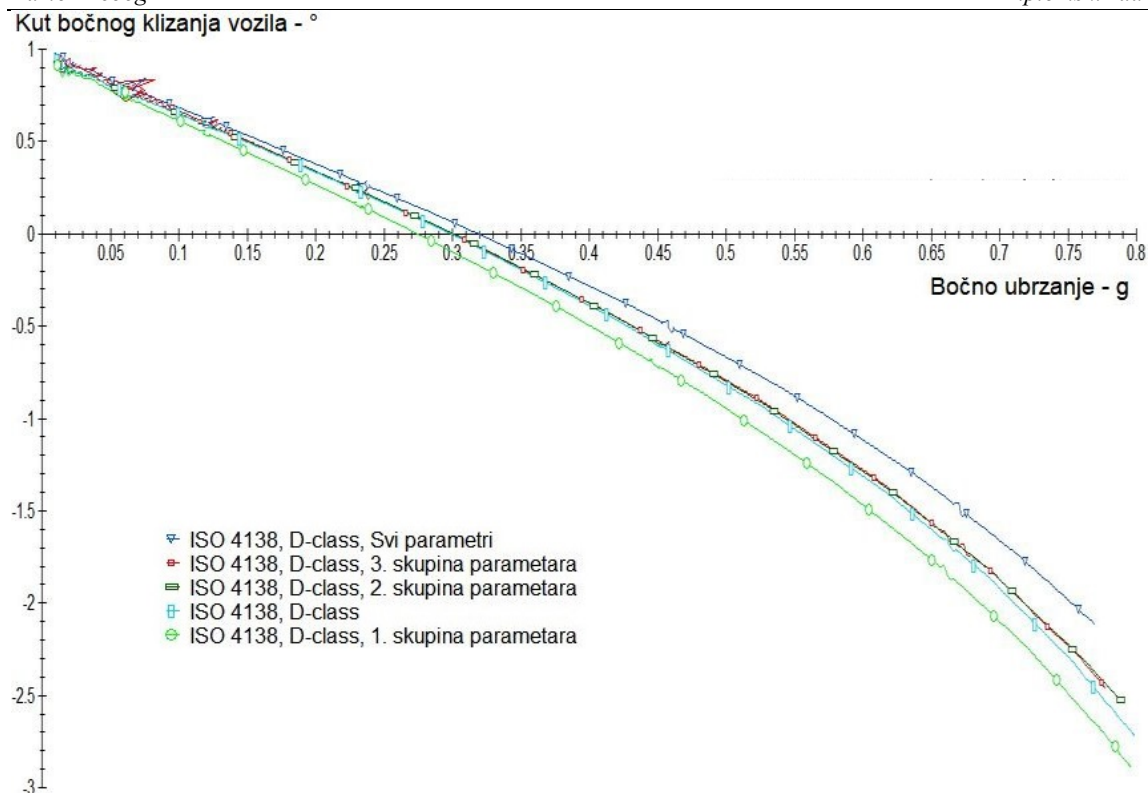
Rezultati simulacija podijeljeni su u tri potpoglavlja – rezultati vozila s pogonom na prednjim kotačima, stražnjim kotačima, te usporedba konačnih modela sve tri konfiguracije pogona. Prikazani su dijagrami dinamičkih karakteristika na kojima je vidljiv utjecaj pojedinih skupina parametara. Prikazani su rezultati za oba smjera izmjene, te je smjer izmjene parametara naveden u nazivu svake slike. Dodatno, dijagrami koji prikazuju poticanje preupravljivosti vozila, uz naziv skupine parametara sadrže i oznaku #2.

### 5.2.1. Rezultati modela s pogonom na prednjim kotačima



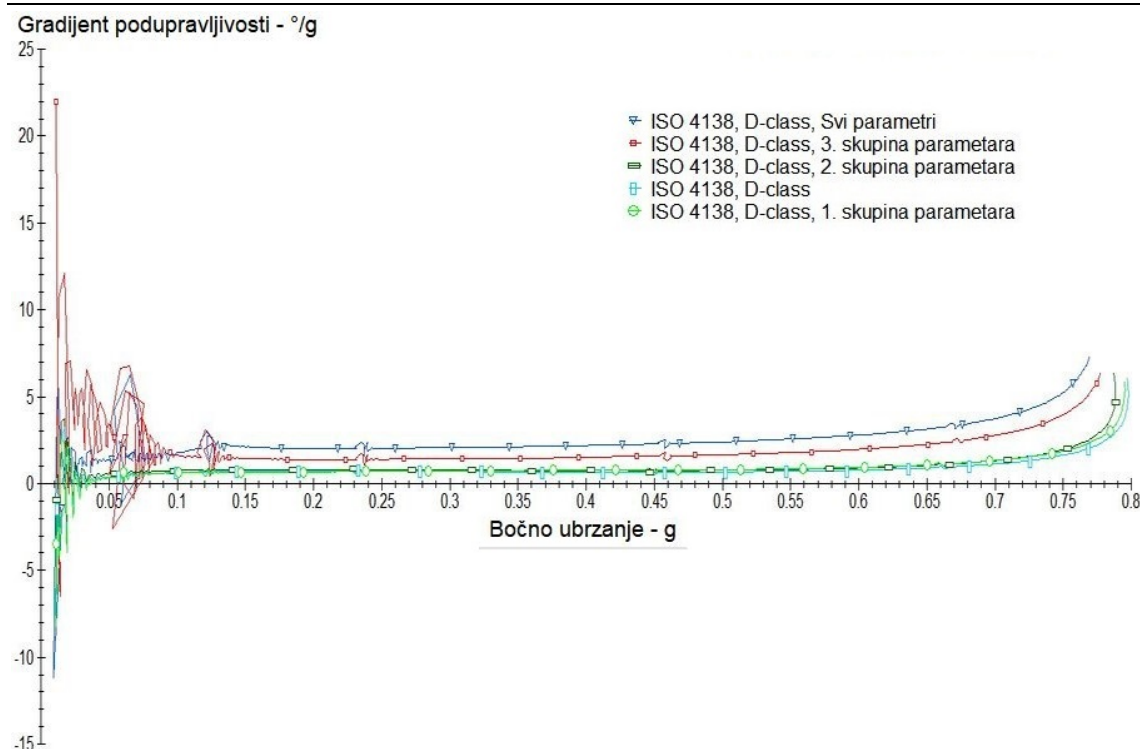
**Slika 38. Kut zakreta upravljača, FWD, poticanje podupravljivosti**

Ovisnost kuta zakreta o porastu bočnog ubrzanja modela s pogonom na prednjim kotačima prikazana je na Slika 38. Početno ponašanje vozila je pri vrijednostima bočnog ubrzanja do 0,3 g podupravljivo (vidljivo po pozitivnom nagibu krivulje), te potom prelazi u neutralnije karakteristiku. Dodatnim porastom bočnog ubrzanja, inicijalna konfiguracija postaje izrazito podupravljiva, što je vidljivo po naglom porastu kuta zakreta upravljača. Kod vozila s izmijenjenim parametrima, može se uočiti kako 1. i 2. skupina parametara nemaju značajan utjecaj na promatranu veličinu, no 3. skupina parametara uklanja neutralnu karakteristiku vozila u području srednjih iznosa bočnog ubrzanja, te je vozilo izrazito podupravljivo kroz cijeli raspon vrijednosti bočnog ubrzanja. Model vozila sa izmijenjene sve tri skupine parametara pokazuje još značajniji porast kuta zakreta upravljača, te se može zaključiti kako je kumulativan utjecaj svih skupina utjecajnih parametara veći od zbrojenog utjecaja svih skupina zasebno.



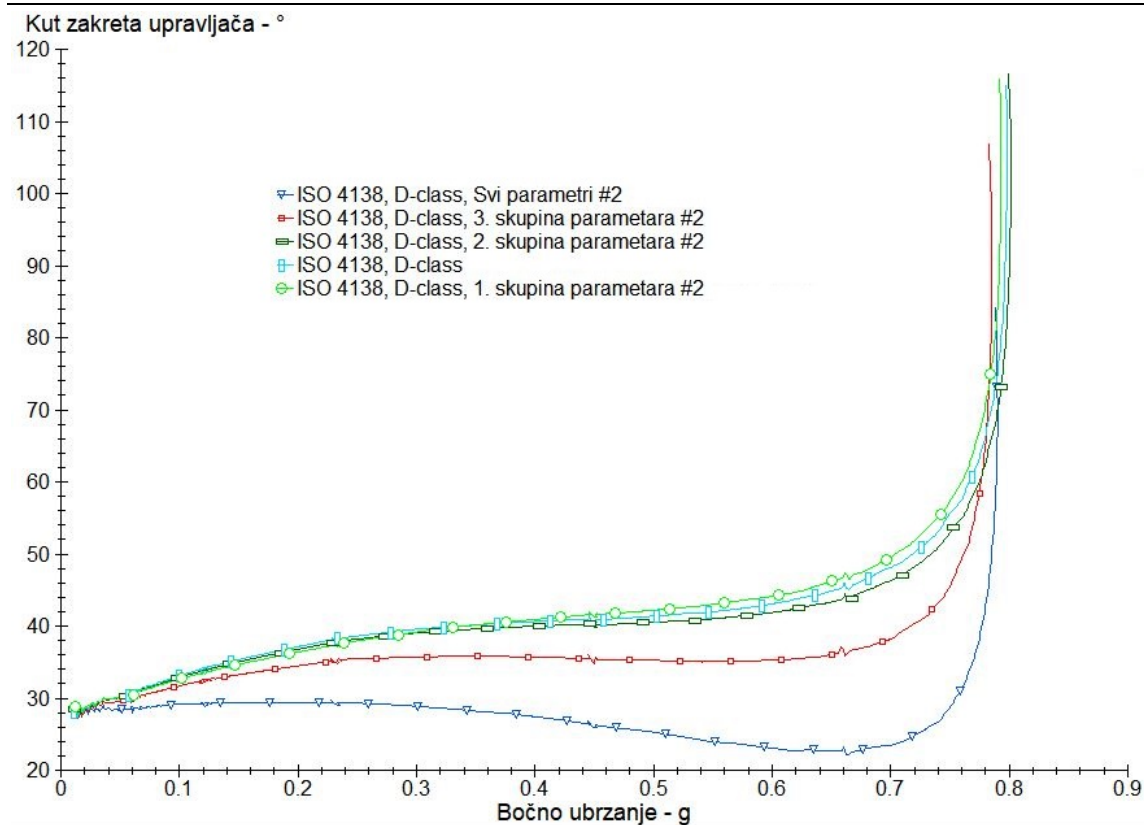
**Slika 39. Kut bočnog klizanja vozila, FWD, poticanje podupravljlivosti**

Dijagram kuta bočnog klizanja vozila pogonjenog prednjim kotačima poticanog na podupravljlivost prikazan je na Slika 39. Iz dijagrama je vidljivo kako 2. i 3. skupina utjecajnih parametara, iako ublažavaju pad krivulje, zasebno imaju zanemariv utjecaj na promjenu kuta bočnog klizanja vozila. Međutim, vrijednost kuta bočnog klizanja za 1. skupinu utjecajnih parametara već pri niskim vrijednostima bočnog ubrzanja počinje značajnije odstupati od inicijalne konfiguracije vozila. Utjecaj parametara pokazuje se zanimljivim iz razloga što 1. skupina parametara uzrokuje strmiji pad krivulje, što bi impliciralo da se radi o preupravljlivom vozilu, no kako ne dolazi do naglog pada vrijednosti pri visokim vrijednostima bočnog ubrzanja, zaključak je kako je vozilo i dalje podupravljlivo. Promatranjem krivulje modela sa svim izmijenjenim parametrima, vidljivo je kako je kumulativan utjecaj značajno smanjenje kuta bočnog klizanja vozila.



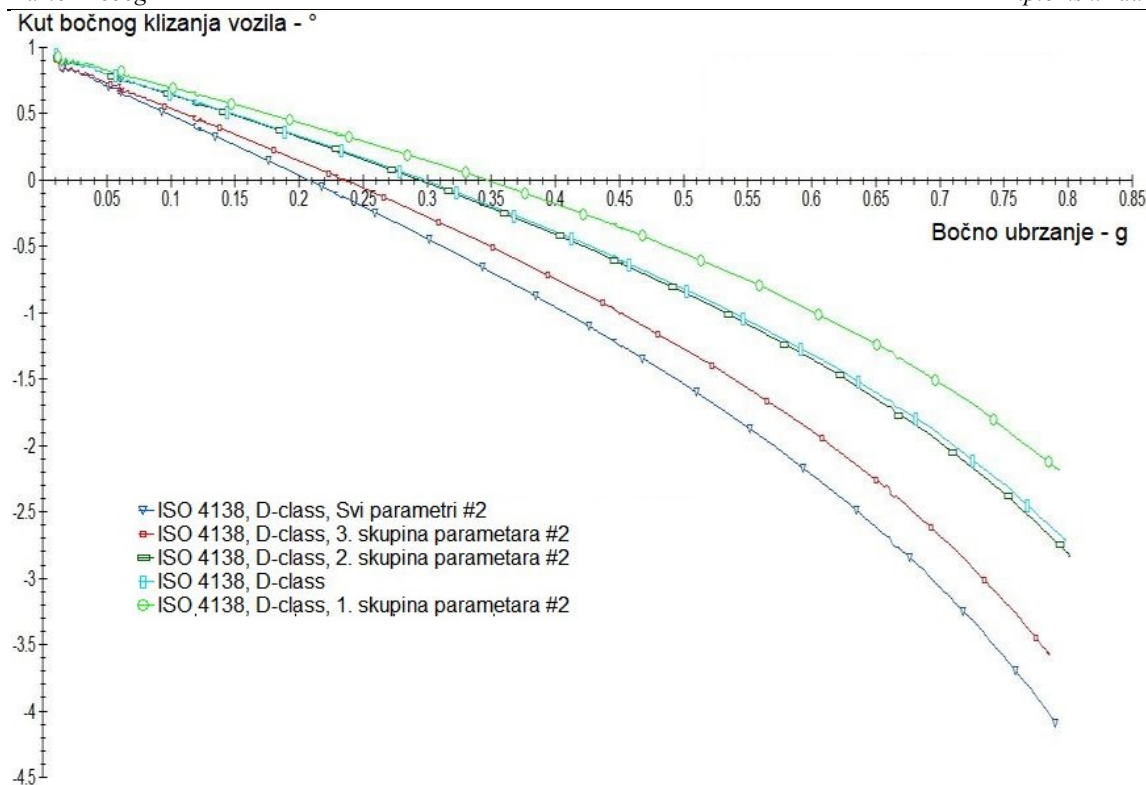
**Slika 40. Gradijent podupravljalivosti, FWD, poticanje podupravljalivosti**

Slika 40. prikazuje promjenu gradijenta podupravljalivosti vozila s porastom bočnog ubrzanja. Bitno je napomenuti kako pozitivna vrijednost ove veličine znači da je riječ o podupravljalivom vozilu, dok je negativna vrijednost karakteristična za preupravljaliva vozila. Iz dijagrama je vidljivo kako su sve konfiguracije vozila, od početne pa do modela sa svim izmijenjenim parametrima, podupravljaljive karakteristike, što se slaže sa zaključcima donesenim u analizi dijagrama sa Slika 38. i Slika 39. Također je vidljivo kako 1. i 2. skupina parametara imaju sličnu vrijednost gradijenta kao i inicijalna konfiguracija vozila. Kao i kod kuta zakreta upravljača, do značajnijeg odmak dolazi pri visokim vrijednostima bočnog ubrzanja ( $a_y > 0,7$  g). Utjecaj 3. skupine parametara vidljiv je od samog početka i ostvarivanja ustaljenog stanja vožnje – vrijednost gradijenta inicijalne konfiguracije te 1. i 2. skupine parametara iznosi oko 1 °/g, dok je vrijednost gradijenta za 3. skupinu gotovo dvostruka, odnosno oko 2 °/g. Model vozila sa svim izmijenjenim parametrima pokazuje dodatno povećanje podupravljalivosti, te vrijednost gradijenta pri rasponu bočnog ubrzanja od 0,15 g do 0,55 g iznosi oko 3 °/g.



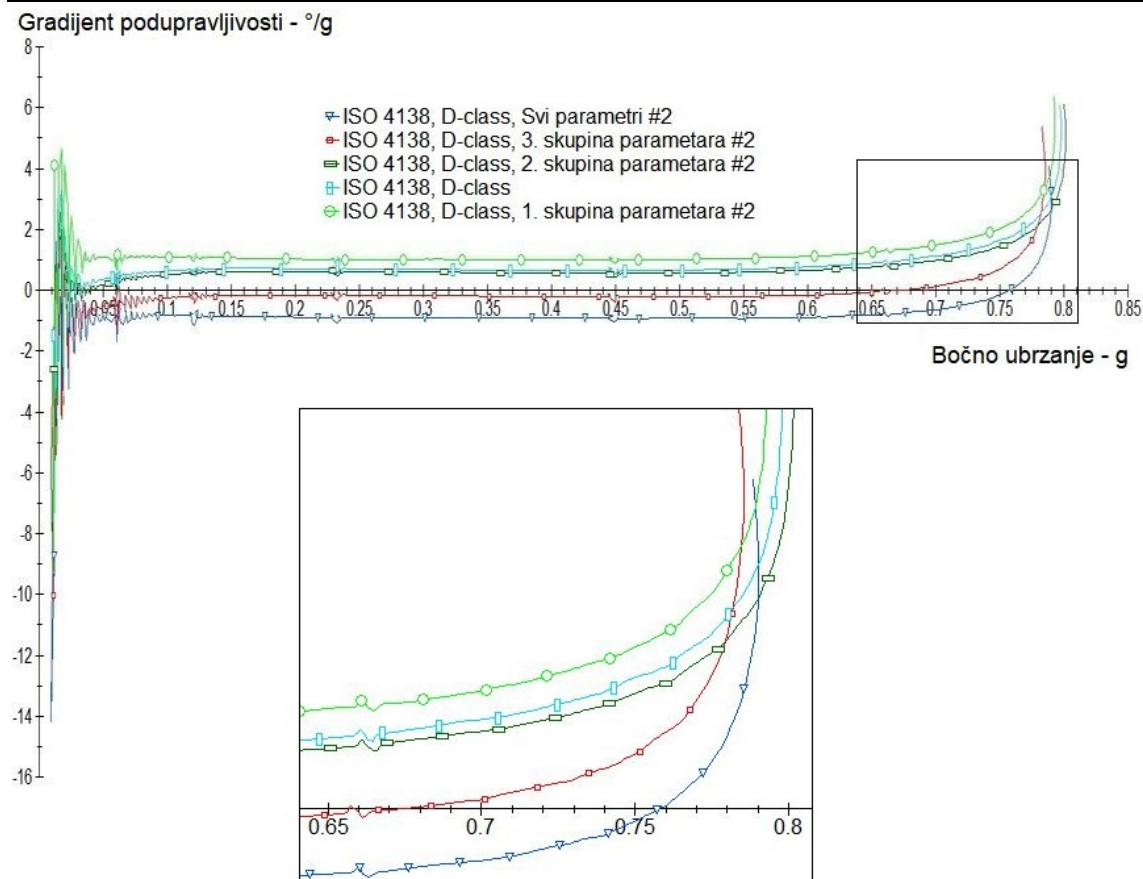
**Slika 41. Kut zakreta upravljača, FWD, poticanje preupravljivosti**

Slika 41. prikazuje dijagram promjene kuta zakreta upravljača za vozilo pogonjeno prednjim kotačima poticano na preupravljivo ponašanje. Utjecaj 1. i 2. skupine parametara može se opisati kao blago smanjenje podupravljivosti vozila, te neutralnije ponašanje pri srednjim iznosima bočnog ubrzanja. Suprotno tome, 3. skupina parametara pokazuje značajan utjecaj, te vozilo, nakon početne faze podupravljivosti, koja vrijedi do 0,3 g bočnog ubrzanja, prelazi u blago preupravljivu karakteristiku, što je vidljivo iz negativnog nagiba dijagrama. Međutim, pri visokim vrijednostima, do izražaja dolazi utjecaj konfiguracije pogona, te se karakteristika vozila vraća u podupravljivost. Ista stvar događa se sa vozilom sa svim izmijenjenim parametrima, uz nepostojanje početne podupravljivosti, već vozilo iz neutralnog prelazi u izrazito preupravljivo vozilo, te potom, pri vrijednostima bočnog ubrzanja većeg od 0,65 g poprima podupravljivu karakteristiku.



Slika 42. Kut bočnog klizanja vozila, FWD, poticanje preupravljivosti

Utjecaj skupina utjecajnih parametara na promjenu kuta bočnog klizanja prikazan je na Slika 42. Vidljivo je kako je utjecaj parametara podešenih na preupravljivost značajniji nego utjecaj podešavanja na podupravljivost prikazan na Slika 39. Vidljivo je kako 1. skupina parametara poprima manji negativni nagib krivulje, te bi se to moglo okarakterizirati kao povećanje podupravljivosti vozila, iako su parametri podešavani na preupravljivost. Međutim, to se ne slaže s dijagramima na Slika 41. i Slika 43., te je zaključak kako je vozilo preupravljivije uz izmjenjenu orijentaciju vozila u zavoju. Suprotan učinak uočljiv je promatranjem 3. skupine parametara, koja značajno povećava pad kuta bočnog klizanja vozila, te isti iznosi  $-3,5^\circ$  u odnosu na  $-2,6^\circ$  pri maksimalnom ostvarivom bočnom ubrzanju. Utjecaj 2. skupine parametara je zanemariv. Model vozila sa svim izmjenjenim parametrima pokazuje još strmiji pad vrijednosti. Iako su modeli vozila s izmijenjenom 3. skupinom parametara i svim parametrima preupravljivi, iz ovog dijagrama to nije vidljivo. Naime, pri visokim vrijednostima bočnog ubrzanja ne dolazi do naglog pada kuta bočnog klizanja iz razloga što su vozila u tim područjima lokalno podupravljiva.

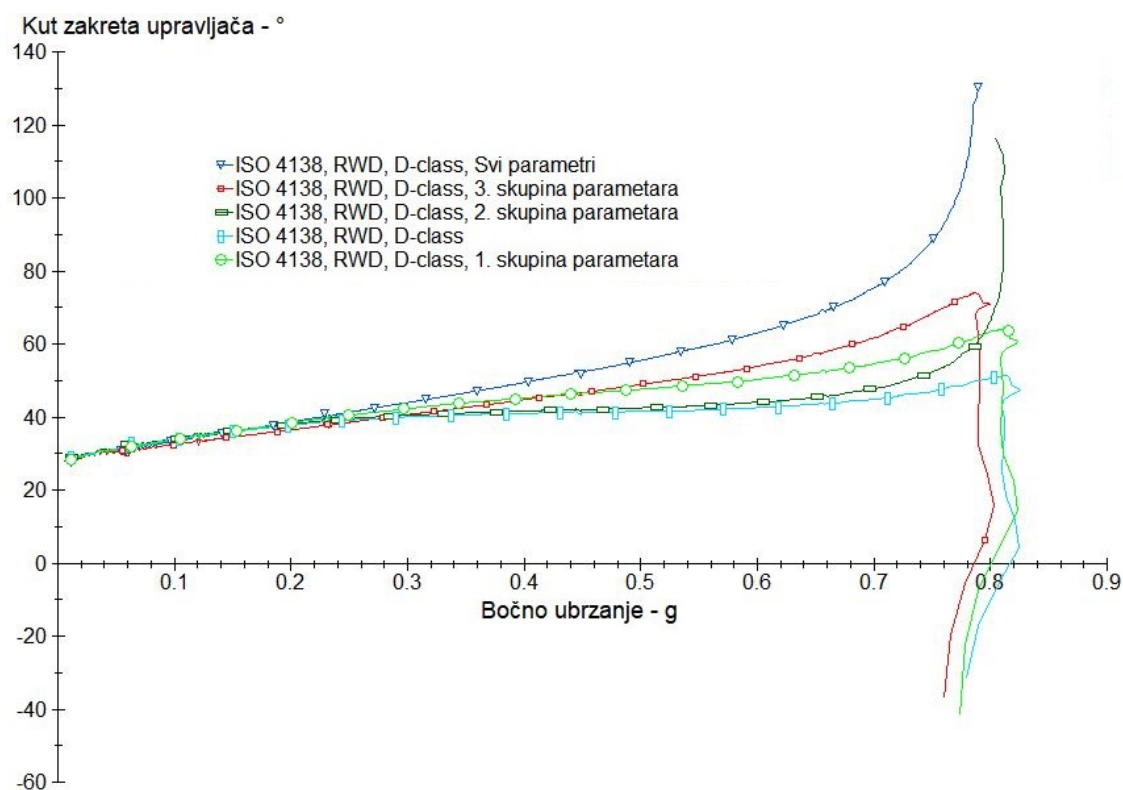


**Slika 43. Gradijent podupravljivosti, FWD, poticanje preupravljivosti**

Gradijent podupravljivosti vozila poticanih na preupravljivo ponašanje prikazan je na dijagramu Slika 43. Ovaj dijagram u skladu je s tvrdnjama i zaključcima donesenim na osnovu Slika 41. Vidljivo je kako su, uz inicijalnu konfiguraciju, modeli vozila s izmijenjenim utjecajnim parametrima 1. i 2. skupine i dalje podupravljivi, uz manje promijene prema neutralnijem ponašanju vozila. Model vozila s 3. skupinom izmijenjenih parametara pokazuje blagu preupravljivost (vrijednost gradijenta manja od nule), dok je vozilo sa svim izmijenjenim parametrima izrazito preupravljivo. Vozilo s 3. skupinom izmijenjenih parametara prelazi u podupravljivu karakteristiku pri vrijednosti bočnog ubrzanja od 0,67 g, dok se isto za model vozila sa izmijenjenim svim parametrima događa pri 0,76 g, što je vidljivo na uvećanom prikazu.

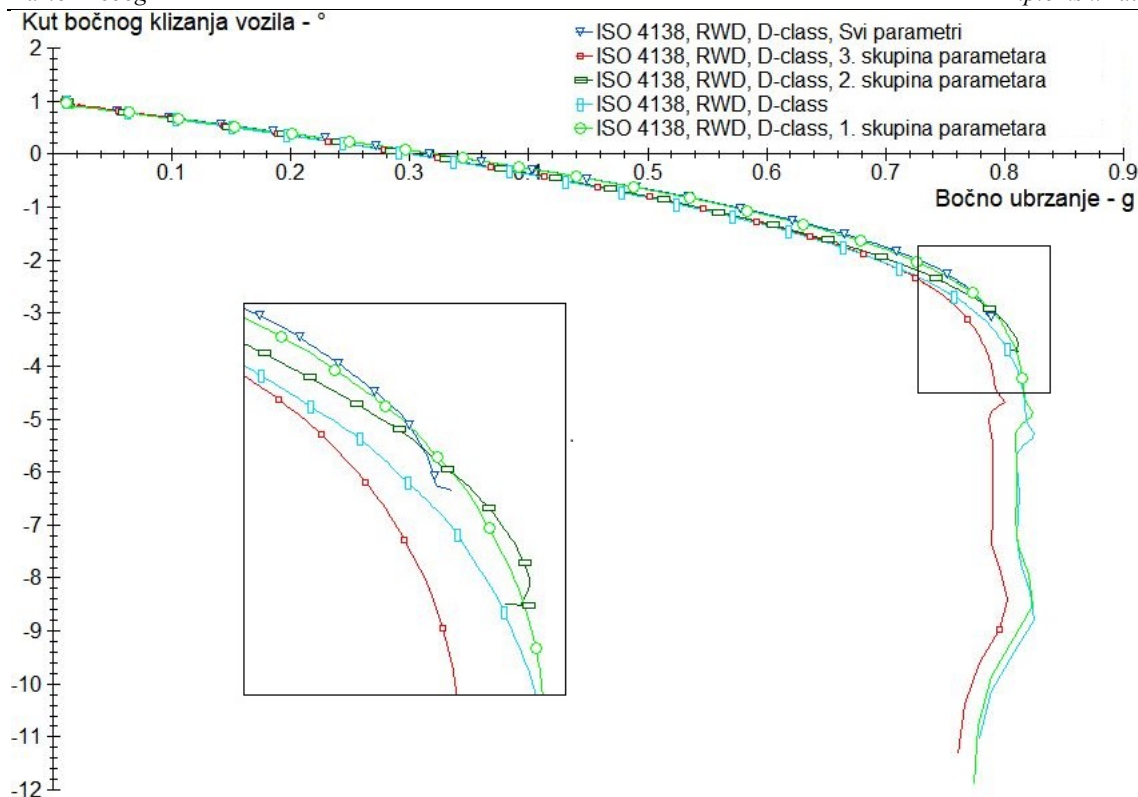


### 5.2.2. Rezultati modela s pogonom na stražnjim kotačima



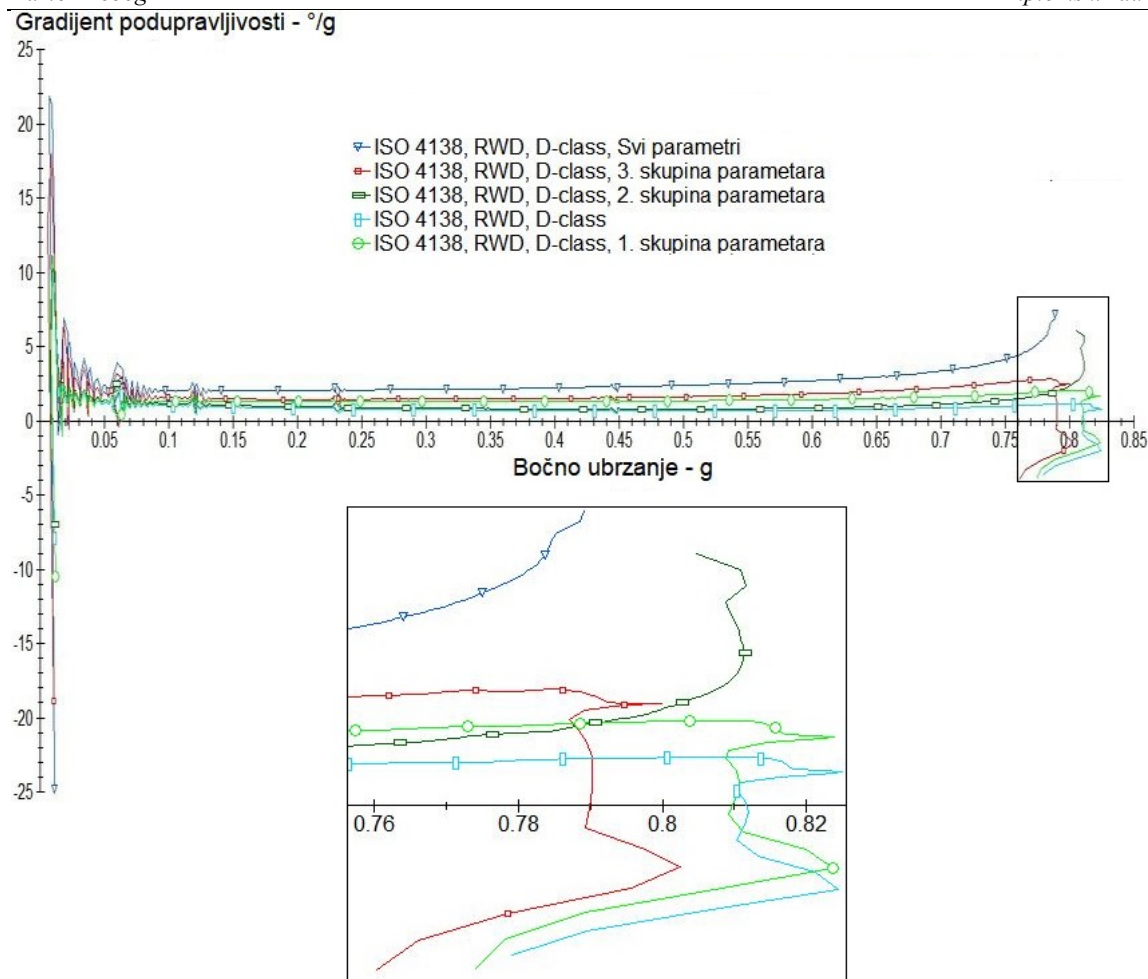
**Slika 44. Kut zakreta upravljača, RWD, poticanje podupravljivosti**

Dijagram promjene kuta zakreta upravljača vozila pogonjenog stražnjim kotačima poticanog na podupravljivo ponašanje prikazan je na Slika 44. Iz dijagrama je vidljivo kako su sva vozila pri vrijednostima bočnog ubrzanja manjim od 0,3 g podupravljive karakteristike. U području između 0,3 g i 0,6 g, inicijalna konfiguracija te model 2. skupine izmijenjenih parametara poprimaju neutralniju karakteristiku upravljivosti, dok su ostali modeli vozila i dalje podupravljivi. Inicijalna konfiguracija, zajedno s modelima 1. i 3. skupine izmijenjenih parametara pokazuje lokalno preupravljivu karakteristiku pri najvišim ostvarivim vrijednostima bočnog ubrzanja, što se može opisati kao utjecaj konfiguracije pogona, budući da vozilo pogonjeno stražnjim kotačima više teži preupravljivom ponašanju. Utjecaj pogona prevladan je u modelima s izmijenjenom 3. skupinom parametara te izmijenjenim svim parametrima. Nagib krivulje modela vozila s izmijenjenim svim parametrima kroz cijeli raspon bočnog ubrzanja pokazuje kako je riječ o izrazito podupravljivom vozilu.



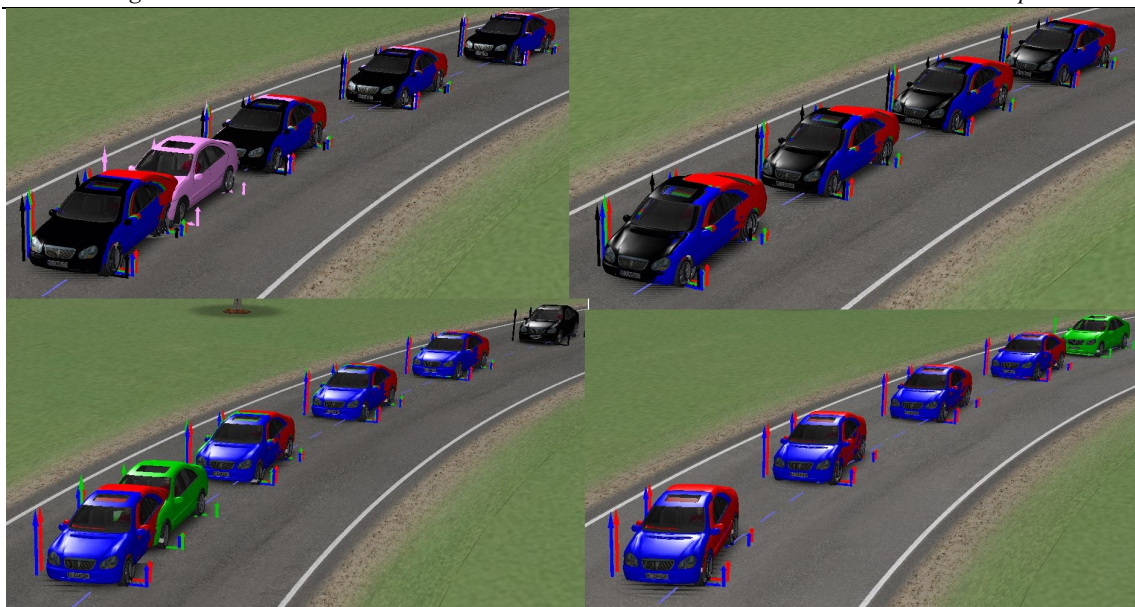
**Slika 45. Kut bočnog klizanja vozila, RWD, poticanje podupravljivosti**

Slika 45. prikazuje promjenu kuta bočnog klizanja vozila pogonjenog stražnjim kotačima s parametrima podešenim na podupravljivost. Vidljivo je kako je utjecaj svih skupina parametara, zasebno i kumulativno, zanemariv do vrijednosti bočnog ubrzanja manjeg od 0,75 g. Pri bočnom ubrzanju većem od navedene vrijednosti, može se zaključiti kako se u slučaju inicijalne konfiguracije, kao i konfiguracije s izmijenjenom 1. i 3. skupinom parametara, radi o preupravljivom vozilu, što je vidljivo iz naglog pada vrijednosti kuta bočnog klizanja. Do naglog pada ne dolazi gledajući krivulje za modele s izmijenjenom 2. skupinom parametara te izmijenjenim svim utjecajnim parametrima, te se može zaključiti kako su oni podupravljive karakteristike. Takvi zaključci u skladu su s onima donesenim na temelju dijagrama sa Slika 44.



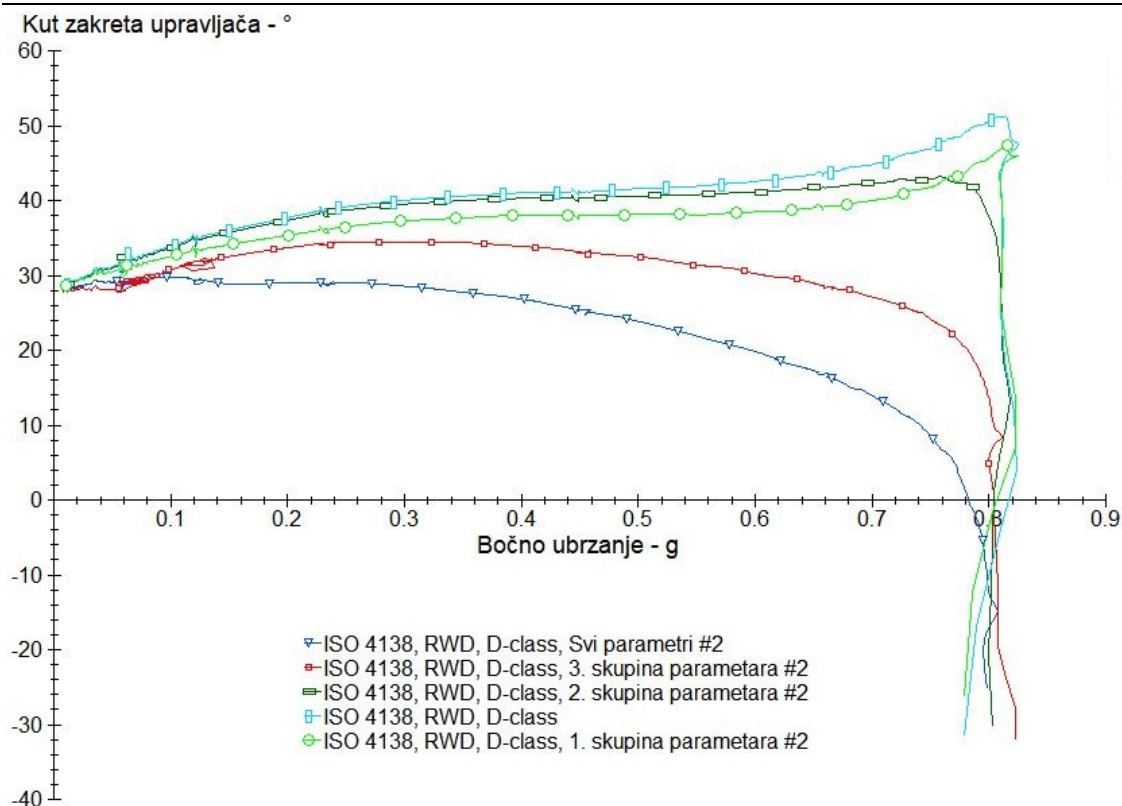
Slika 46. Gradijent podupravljivosti, RWD, poticanje podupravljivosti

Dijagram gradijenta podupravljivosti prikazan je na Slika 46. Vrijednost gradijenta pozitivna je za sva vozila, no za modele inicijalne konfiguracije, kao i one s izmijenjenim parametrima 1. i 3. skupine, pri vrijednostima bočnog ubrzanja oko 0,8 g poprima negativnu vrijednost, što je vidljivo na uvećanom dijelu dijagrama. Kao što je već navedeno prije, to potvrđuje tezu da se radi o lokalno preupravljivim vozilima. Preostala dva modela, onaj sa izmijenjenim svim parametrima te model s izmijenjenim parametrima 2. skupine, kroz cijeli raspon imaju pozitivnu vrijednost gradijenta, koja pri visokim vrijednostima bočnog ubrzanja dodatno poraste. Time je prevladan utjecaj konfiguracije pogona te je prirodno preupravljivo vozilo (pri visokim vrijednostima  $a_y$ ), postiglo podupravljivu karakteristiku.



**Slika 47. Isječci iz simulacije, RWD, poticanje podupravljivosti**

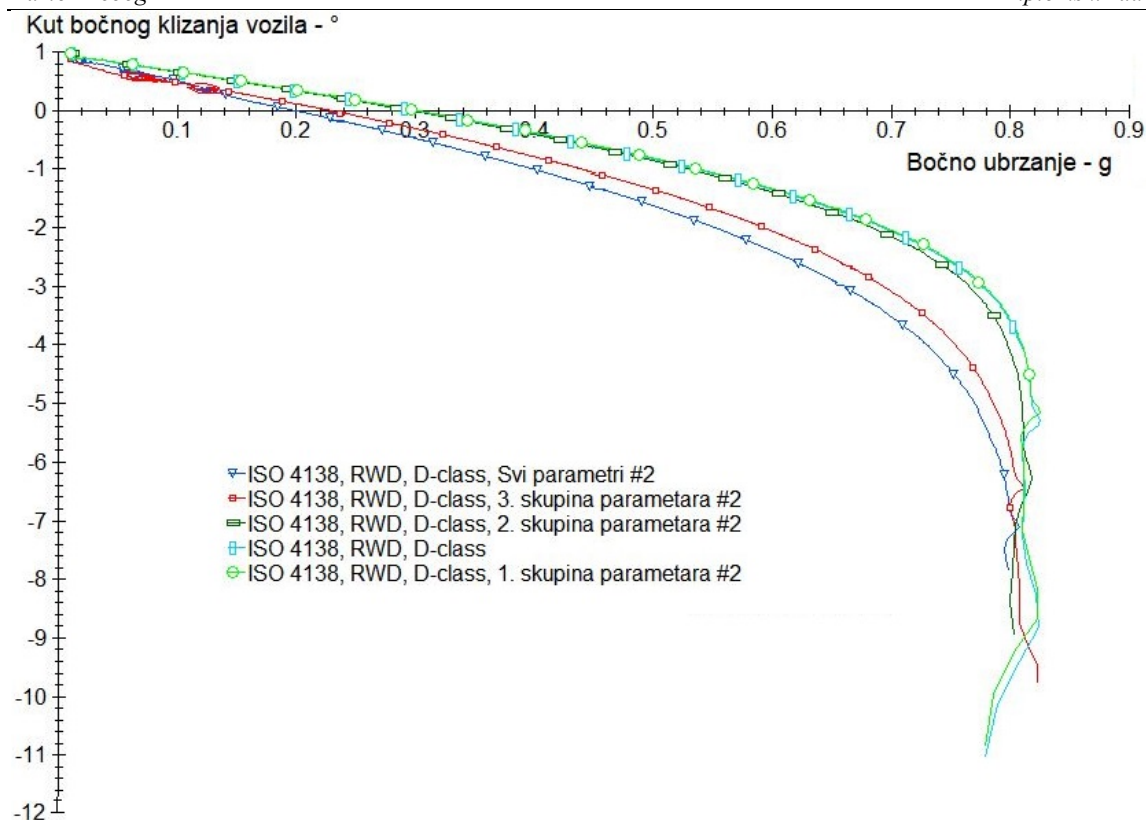
Slika 47. prikazuje isječke iz simulacije, kronološki poredane po kriteriju prekida simulacije za pojedini model vozila. Slike jasno prikazuju razliku između modela vozila koji se pri visokim vrijednostima bočnog ubrzanja ponašaju podupravljivo, odnosno preupravljivo. Drugi i četvrti isječak, odnosno crno, plavo i crveno vozilo, odgovaraju modelima inicijalne konfiguracije, te izmijenjene 1. i 3. skupine parametara vozila. Uočljivo je kako kod tih modela dolazi do izlijetanja stražnjeg kraja vozila, odnosno naglog povećanja u kutnoj brzini oko vertikalne osi, prikazanog na Slika 8. Rozo te zeleno vozilo odgovaraju modelima sa svim izmijenjenim parametrima te izmijenjenom 3. skupinom parametara, koji pokazuju podupravljivu karakteristiku.



**Slika 48. Kut zakreta upravljača, RWD, poticanje preupravljivosti**

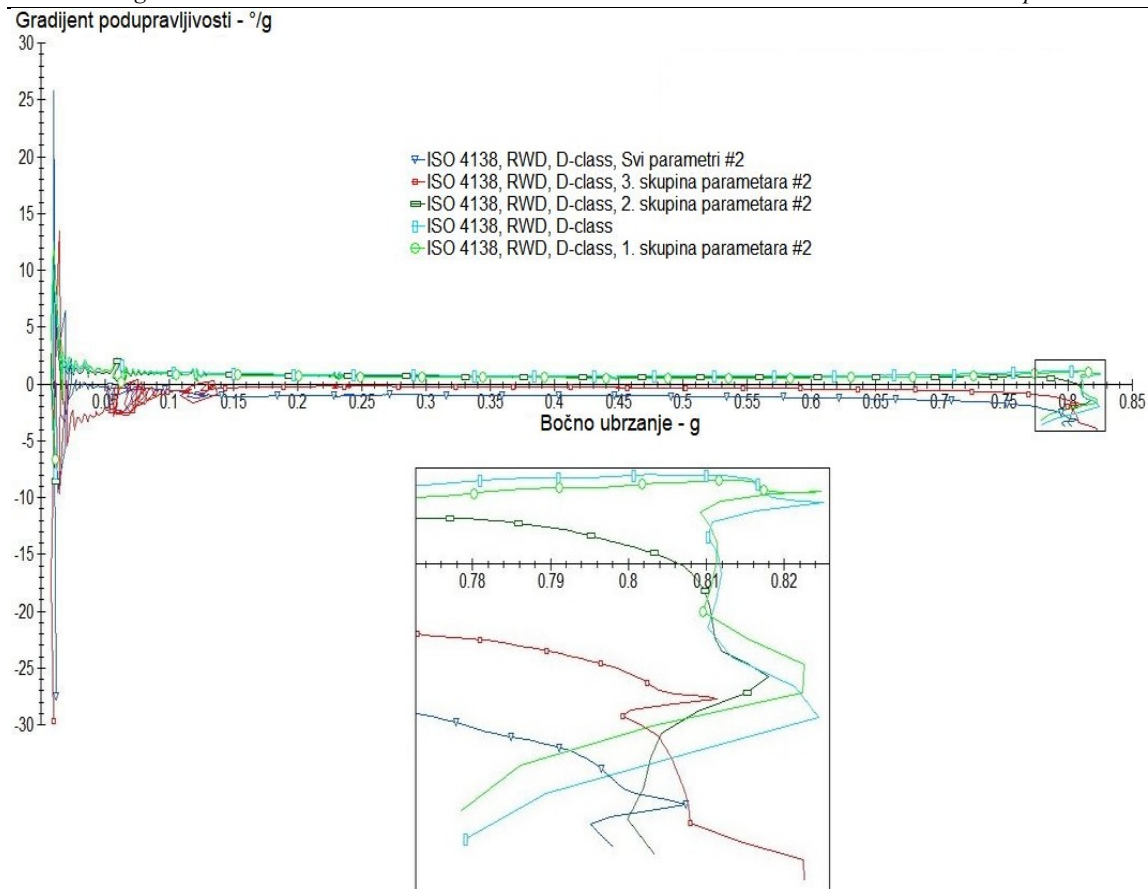
Slika 48. prikazuje promjenu kuta zakreta upravljača za vozilo pogonjeno stražnjim kotačima, s parametrima podešenim na preupravljivost. Iz krivulje promjene za model s 2. skupinom izmijenjenih parametara može se zaključiti da je njihov utjecaj zanemariv do vrijednosti bočnog ubrzanja 0,6 g. Nakon te vrijednosti, utjecajni parametri smanjuju podupravljivom ponašanje vozila te ranije prelaze u lokalnu preupravljivost. Kod 1. skupine utjecajnih parametara krivulja prati onu inicijalne konfiguracije, uz smanjeni potrebni kut zakreta upravljača. Zadnja, 3. skupina utjecajnih parametara pokazuje prelazak iz podupravljivog u preupravljivo ponašanje već prije 0,3 g bočnog ubrzanja, što je vidljivo iz negativnog nagiba krivulje. Model vozila sa izmijenjenim svim parametrima od početka simulacija poprima isprva neutralnu, te potom izrazito preupravljivu karakteristiku.





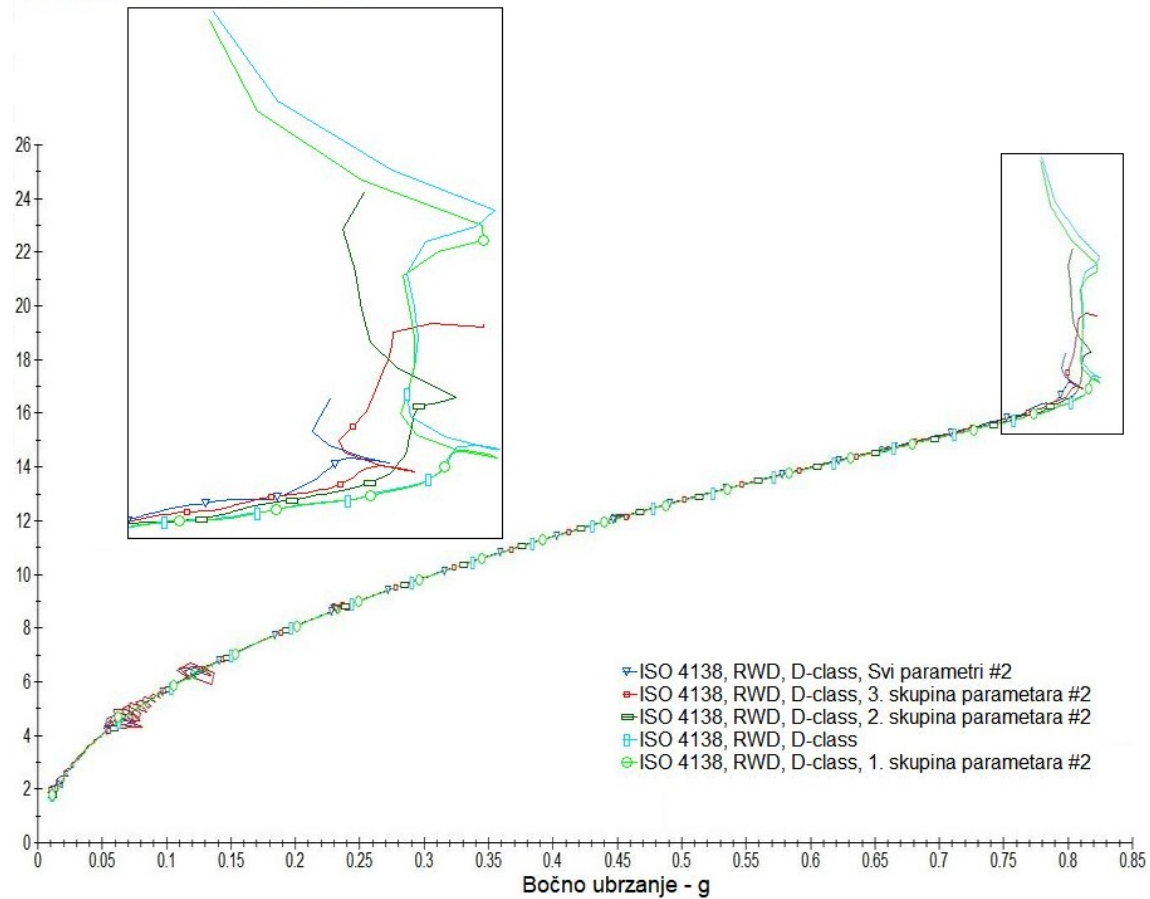
**Slika 49. Kut bočnog klizanja vozila, RWD, poticanje preupravljivosti**

Promjena kuta bočnog klizanja vozila za model sa stražnjim pogonom te parametrima podešenim prema preupravljivom ponašanju prikazana je na Slika 49. Iz dijagrama se može zaključiti kako je utjecaj 1. i 2. skupine utjecajnih parametara na ovu veličinu zanemariv. Do izražaja dolaze parametri iz 3. skupine, koji uzrokuju ubrzani pad kuta bočnog klizanja vozila. Identična promjena, uz veću razliku u vrijednosti, primjetna je kod modela vozila sa izmijenjenim svim parametrima. Također, kod modela vozila s izraženijom promjenom kuta bočnog klizanja, nagli pad vrijednosti ne događa se toliko strmo kao kod inicijalne konfiguracije te modela s izmijenjenim parametrima 1. i 2. skupine, što može upućivati na predvidljivije ponašanje vozila pri približavanju granici upravljivosti. Svi navedeni modeli vozila pokazuju preupravljivu karakteristiku.



**Slika 50. Gradijent podupravljivosti, RWD, poticanje preupravljivosti**

Slika 50. prikazuje promjenu gradijenta podupravljivosti modela vozila stražnje konfiguracije pogona, s utjecajnim parametrima podešenim prema preupravljivom ponašanju. Dijagram promjene gradijenta potvrđuje zaključke donesene analizom Slika 48. i Slika 49. Iz pozitivne vrijednosti gradijenta za vozilo inicijalne konfiguracije parametara, kao i za modele s izmijenjenim parametrima 1. i 2. skupine, potvrđuje se zaključak da se radi o podupravljivim vozilima s lokalno preupravljivom karakteristikom, vidljivom iz prelaska gradijenta u negativnu vrijednost na uvećanom dijelu dijagrama. Također se potvrđuje zaključak kako su model s izmijenjenom 3. skupinom parametara, te model s izmijenjenim svim parametrima kroz cijelo područje bočnog ubrzanja, preupravljive karakteristike.

Kutna brzina oko vertikalne osi -  $^{\circ}/s$ 

Slika 51. Kutna brzina oko vertikalne osi, RWD, poticanje preupravljivosti



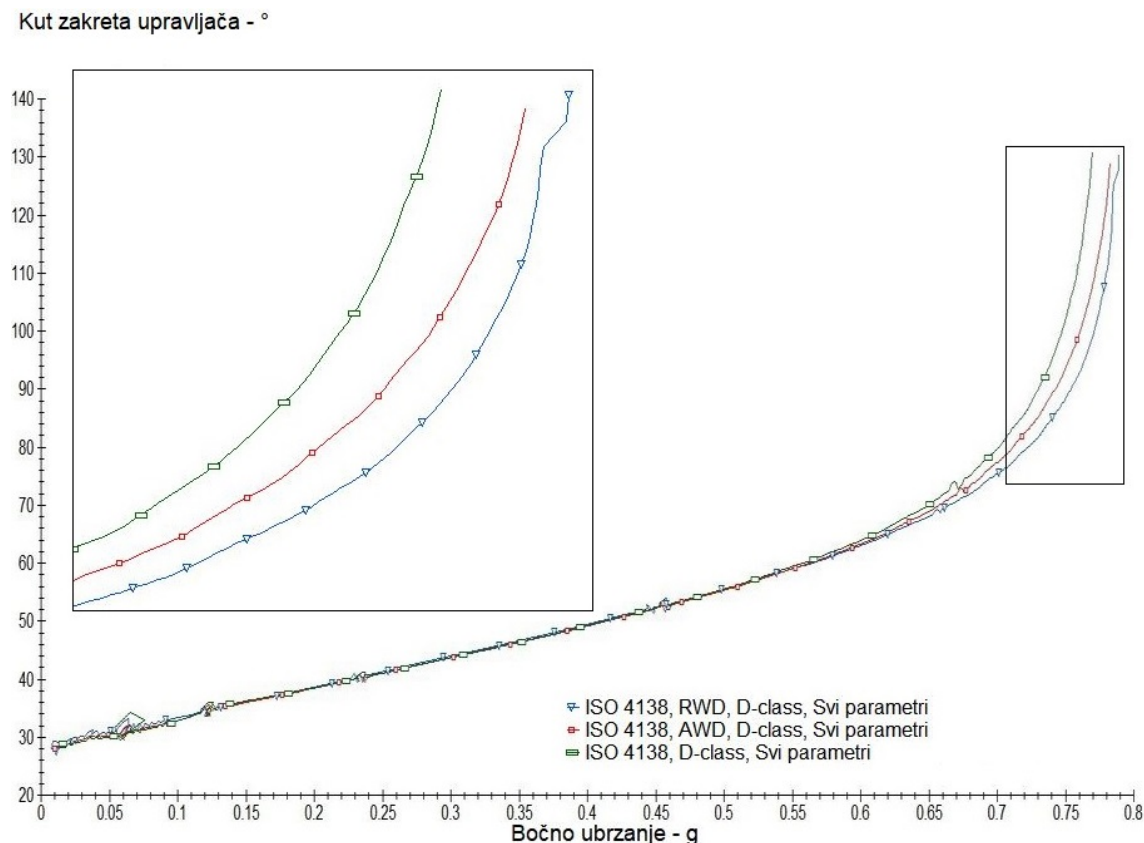
Slika 52. Isječci iz simulacije, RWD, poticanje preupravljivosti



Dodatnu potvrdu donesenih zaključaka za model vozila sa stražnjim pogonom te parametrima podešenim prema preupravljivom ponašanju daje i dijagram promjene kutne brzine oko vertikalne osi s porastom bočnog ubrzanja vozila. Vidljivo je kako svi modeli prate jednaku krivulju porasta kutne brzine oko vertikalne osi, no za modele za koje je ustanovljeno da imaju preupravljivu karakteristiku, u uvećanom dijelu dijagrama uočljiv je nagli skok, odnosno porast kutne brzine, što je u skladu s tvrdnjama o preupravljivom vozilu prikazanim na Slika 8. Zaključci doneseni na temelju dijagrama sa Slika 51., vidljivi su i na isječcima iz simulacije prikazanim na Slika 52.

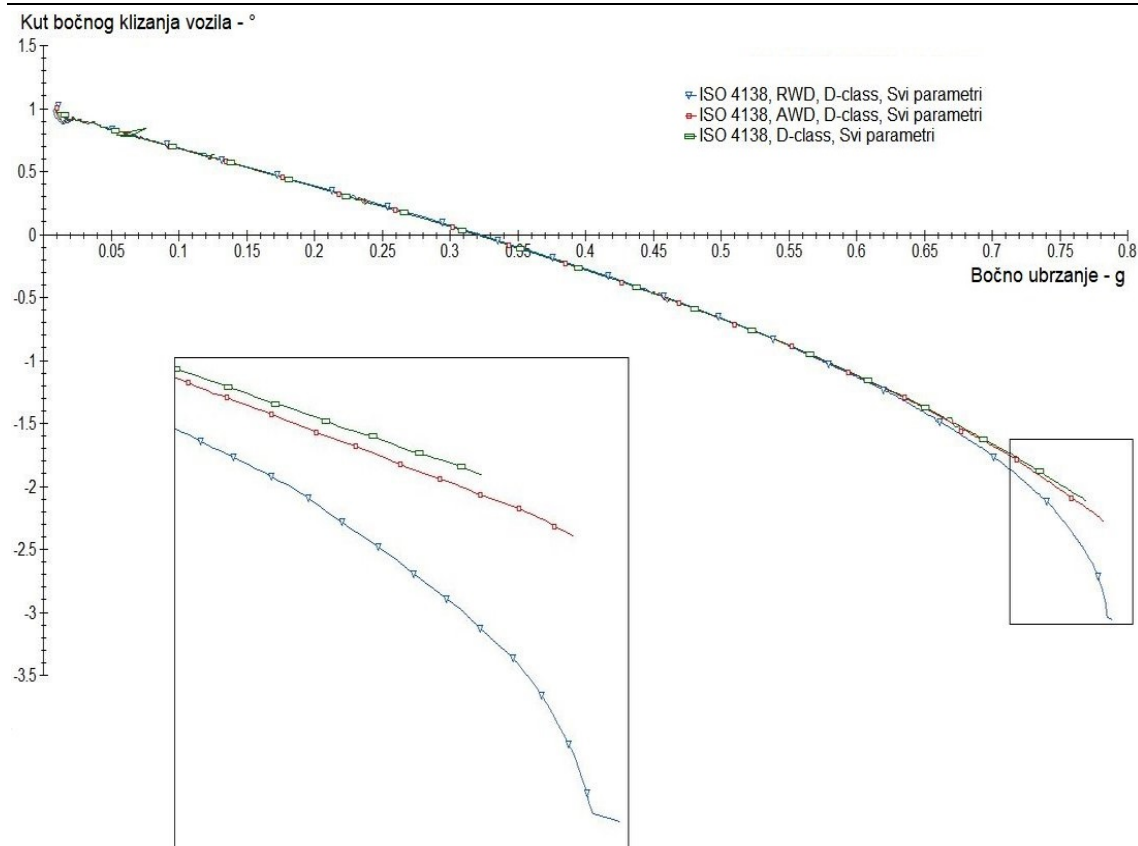
### 5.2.3. Usporedba modela različitih konfiguracija pogona

Posljednje potpoglavlje rezultata predstavlja usporedbu modela sve tri konfiguracije pogona. Zasebno će se usporediti modeli s parametrima podešenim na preupravljljivost, te zasebno modeli s parametrima podešenim na podupravljljivo ponašanje.



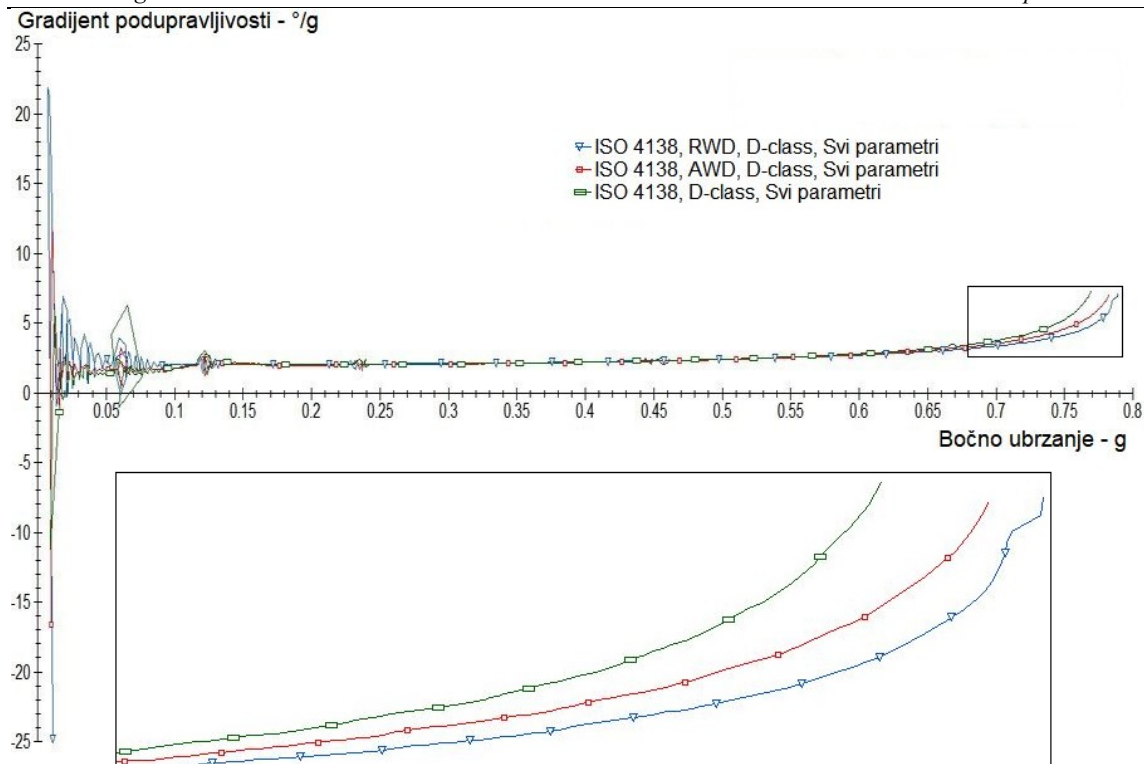
**Slika 53. Kut zakreta upravljača, različite konfiguracije pogona, poticanje podupravljljivosti**

Iz dijagrama kuta zakreta upravljača parametara podešenih na podupravljljivost, prikazanim na Slika 53, vidljivo je da konfiguracija pogona gotovo i nema utjecaja na promatranu veličinu. Blagi utjecaj vidljiv je tek pri vrijednostima bočnog ubrzanja većeg od 0,7 g, gdje se vozilo s pogonom na prednjim kotačima pokazalo kao najpodupravljljivije vozilo. Zatim slijedi vozilo s pogonom na sve kotače, te je najmanja podupravljljivost uočena kod vozila s pogonom na stražnjim kotačima. Time je potvrđena tvrdnja navedena u [1], koja kaže da je vozilo pogonjeno prednjim kotačima više sklono podupravljljivom ponašanju u odnosu na vozila pogonjena stražnjim, odnosno svim kotačima.



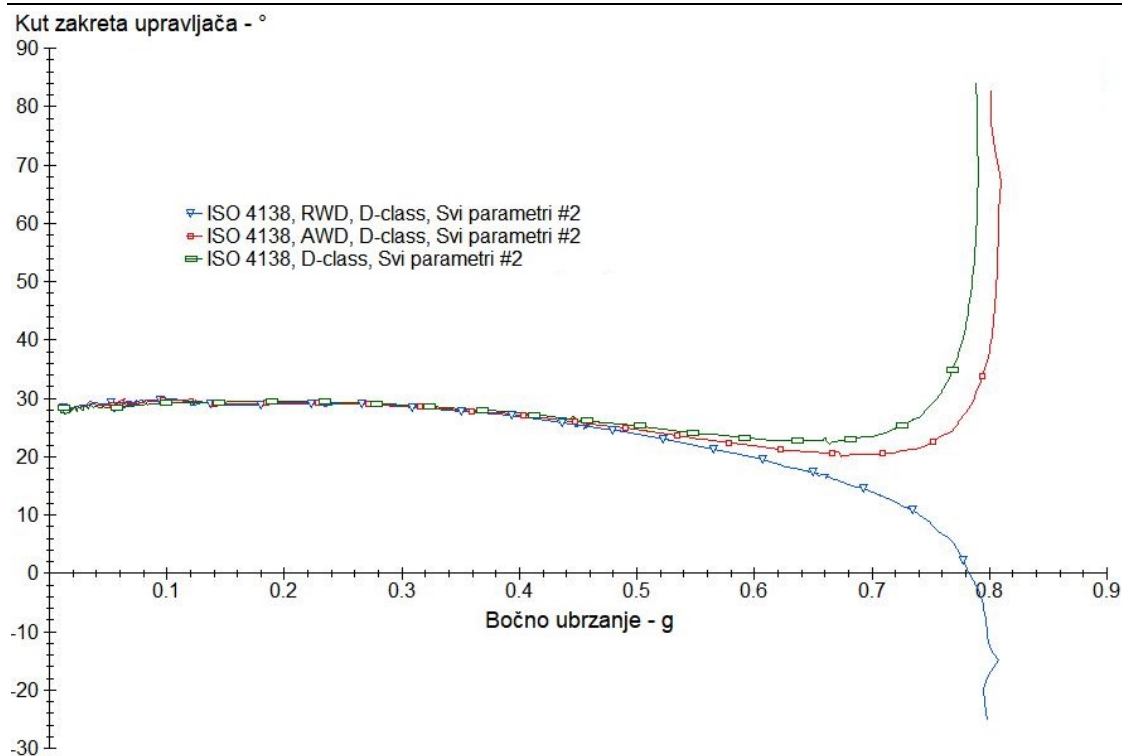
**Slika 54. Kut bočnog klizanja vozila, različite konfiguracije pogona, poticanje podupravljivosti**

Slika 54. prikazuje promjenu kuta bočnog klizanja vozila različitih konfiguracija pogona, s parametrima podešenim prema podupravljivom ponašanju. Kao i kod dijagrama promjene kuta zakreta upravljača, razlika između konfiguracija pogona vidljiva je tek pri visokim vrijednostima bočnog ubrzanja. Na uvećanom dijelu dijagrama vidljivo je kako vozilo s pogonom na prednje i na sve kotače nemaju značajniju razliku u kutu bočnog klizanja vozila, dok model s pogonom na stražnje kotače doživljava strmiji pad krivulje pri vrijednostima bočnog ubrzanja većim od 0,8 g. Iz toga se vidi da je ono najmanje sklono podupravljivom ponašanju, no pad je nedovoljan da bi ga se okarakteriziralo kao preupravljivim vozilom.



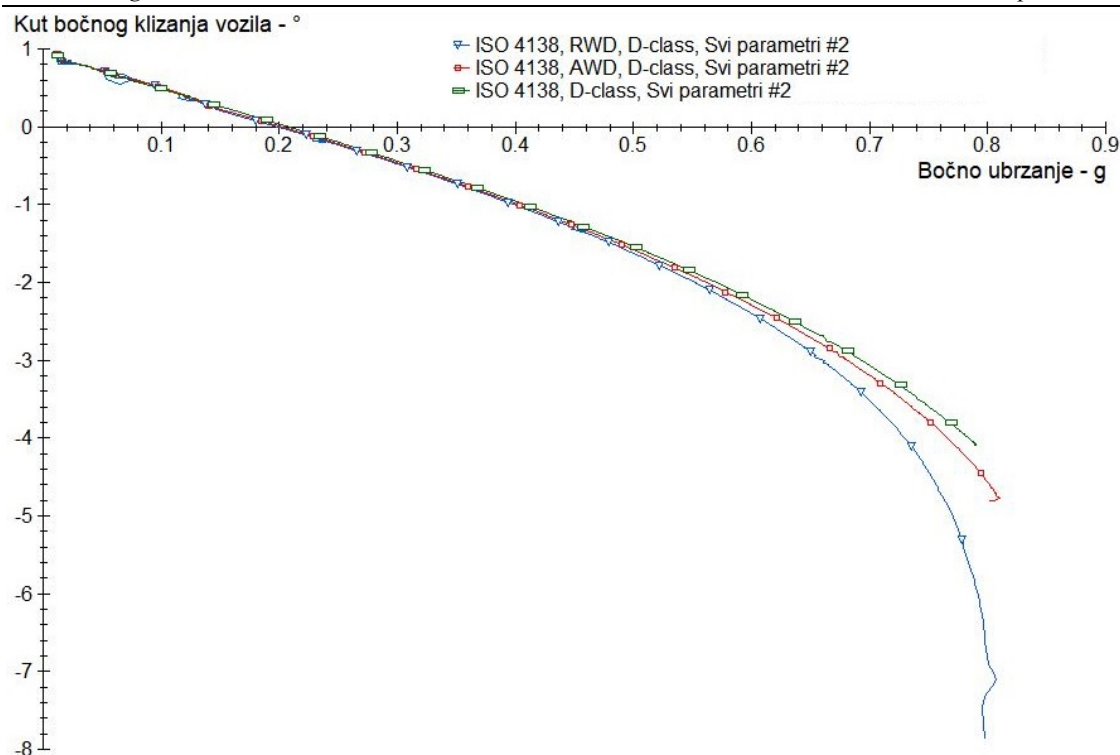
**Slika 55. Gradijent podupravljivosti, različite konfiguracije pogona, poticanje podupravljivosti**

Gradijent podupravljivosti, prikazan na Slika 55, u potpunosti se slaže za tvrdnjama i zaključcima donesenim na temelju dijagrama sa Slika 53 i Slika 54. Ponovno se vozilo sa stražnjim pogonom pokazuje kao najmanje podupravljivo, što je vidljivo iz manjeg porasta gradijenta pri visokim vrijednostima bočnog ubrzanja. Sva tri modela vozila kroz cijeli raspon poprimaju pozitivnu vrijednost gradijenta, što znači da su podupravljive karakteristike. Iako je iz pada kuta bočnog klizanja bilo moguće zaključiti da model pogonjen stražnjim kotačima naginje prema lokalnoj preupravljivosti, iz dijagrama gradijenta podupravljivosti je vidljivo kako to nije točno, budući da vrijednost gradijenta ne počinje opadati pri visokim vrijednostima  $a_y$ .



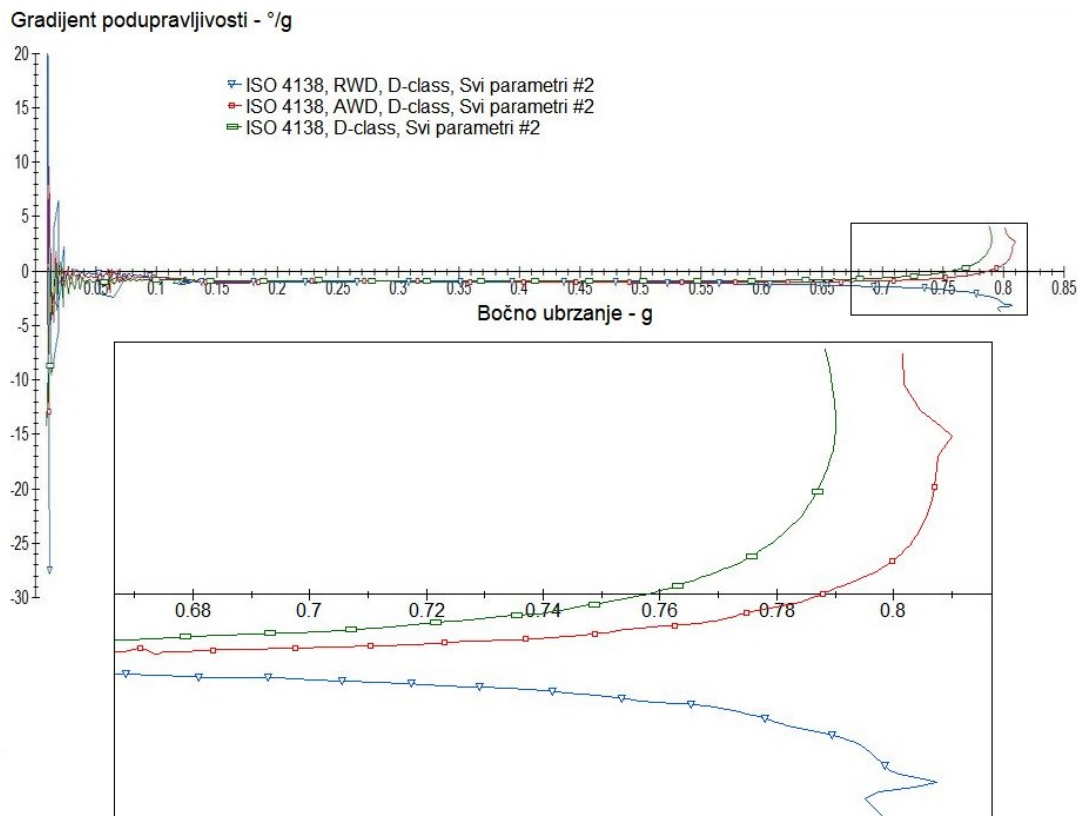
**Slika 56. Kut zakreta upravljača, različite konfiguracije pogona, poticanje preupravljivosti**

Slika 56. prikazuje dijagram kuta zakreta upravljača za različite konfiguracije pogona s parametrima podešenim na preupravljivost. Utjecaj konfiguracije pogona postaje vidljiv tek kada vrijednost bočnog ubrzanja vozila prijeđe 0,5 g. Do te vrijednosti, kako je nagib krivulje negativan, sve tri konfiguracije su preupravljive. Daljnjim povećanjem iznosa bočnog ubrzanja, modeli vozila s pogonom na prednje te sve kotače prelaze iz preupravljive u podupravljivu karakteristiku, dok model vozila s pogonom na stražnje kotače poprima još izraženiju karakteristiku preupravljivosti.



**Slika 57. Kut bočnog klizanja vozila, različite konfiguracije pogona, poticanje preupravljivosti**

Dijagram promjene kuta bočnog klizanja vozila parametara podešenih na preupravljivost prikazan na Slika 57. sličan je onome prikazanim na Slika 54. Ponovno je uočljivo kako je razlika u promjeni kuta bočnog klizanja kod vozila pogonjenih prednjim te svim kotačima zanemariva, dok je pad vrijednost izražen kod vozila sa stražnjim pogonom. Međutim, na ovome dijagramu vidljiv je nagli pad vrijednosti kuta bočnog klizanja, što dovodi do zaključka kako se vozilo sa stražnjim pogonom ponaša preupravljivo, dok je za ostala dva modela moguće zaključiti da se radi o podupravljivoj karakteristici u području visokih vrijednosti bočnog ubrzanja, što je u skladu sa zaključcima sa Slika 56.



**Slika 58. Gradijent podupravljivosti, različite konfiguracije pogona, poticanje preupravljivosti**

Slika 58. prikazuje promjenu gradijenta za vozila s različitim konfiguracijama pogona, te parametrima podešenim na preupravljivo ponašanje vozila. Ovaj dijagram također je u skladu s prethodna dva prikazanima na Slika 56 i Slika 57. Negativna vrijednost ukazuje na preupravljivu karakteristiku sva tri modela vozila, koja kod modela s pogonom na prednjim te svim kotačima, prelazi u podupravljivost pri vrijednostima bočnog ubrzanja od 0,76 g te 0,79 g. Kod vozila s pogonom na stražnjim kotačima, pri visokim vrijednostima bočnog ubrzanja preupravljiva karakteristika postaje sve izraženija padom vrijednosti gradijenta.

## 6. ZAKLJUČAK

Na temelju definicija podupravljivosti / preupravljivosti koje se mogu pronaći u literaturi te opisa karakterističnog ponašanja vozila prilikom vožnje u zavoju, identificirani su ključni parametri s utjecajem na podupravljivost / preupravljivost. Kako bi se ispitao utjecaj parametara, u programskom paketu CarSim su provedene simulacije upravljivosti u skladu sa standardnim ispitnim procedurama opisanim u standardu ISO 4138. Pokazalo se kako se izmjenom parametara vozilo koje je sklono podupravljivosti može konfigurirati u preupravljivo stanje i obrnuto. Kao najutjecajnije parametri pokazali su se dimenzije pneumatika, uzdužni kut osi zakretanja te usmjerenost kotača, dok najmanji utjecaj pokazuje prigušne karakteristike ovjesa i pneumatika. Također je potvrđena pretpostavka o utjecaju konfiguracije pogona na upravljivost vozila, uspoređujući jednaka vozila sa sve tri konfiguracije pogona, gdje je ono sa prednjim pogonom ustanovljeno kao najviše sklono podupravljivom ponašanju, dok je votio sa stražnjim pogonom se pokazalo kao najviše sklono preupravljivom ponašanju. Rezultati simulacija u skladu su s očekivanim pretpostavkama iz literature.



## LITERATURA

- [1] Heissing. B., Ersoy, M.: Chassis Handbook, 2011.
- [2] Abe, M.: Vehicle Handling Dynamics, 2009.
- [3] Michelin: The Tyre – Grip, 2001.
- [4] Gillespie, T.: Fundamentals of Vehicle Dynamics, 1992.
- [5] ISO 4138: Passenger cars – Steady-state circular driving behaviour – Open-loop test methods, 2004.
- [6] <https://insideevs.com/range-increasing-low-rolling-resistance-tires-falling-out-of-favor-with-drivers/>
- [7] <http://www.carmagazine.co.uk/car-news/industry-news/ferrari/>
- [8] <http://www.samwells.com/bc/tw/product-tw/product-road-test-tw/product-road-test-corrsys-tw>
- [9] Šagi, G.: Predavanja i vježbe iz kolegija „Motorna vozila“ i „Računalne simulacije u razvoju motora i vozila“, 2017.
- [10] <http://www.mscsoftware.com/application/multibody-dynamics>
- [11] IKA – A test procedure for vehicle dynamic controllers
- [12] Crolla, D.: Encyclopedia of Automotive Engineering, 2015.
- [13] Harrer, M., Pfeffer P.: Steering Handbook, 2017.

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**